



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologické zásady pokládky ovlivňující kvalitu hotových vrstev

Influence of technological principles of laying asphalt over layer quality

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: **Ing. Petr Mondschein, Ph.D.**

Jiří Fikar

2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Fíkar Jméno: Jiří Osobní číslo: 456772

Zadávací katedra: K136 - Katedra silničních staveb

Studijní program: SI - Stavební inženýrství

Studijní obor: K - Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Technologické zásady pokládky ovlivňující kvalitu hotových vrstev

Název bakalářské práce anglicky: Influence of technological principles of laying of asphalt over layer quality

Pokyny pro vypracování:

Rešerše problematiky hutnění, hutnicí sestavy a mechanismy, parametry ovlivňující správnost zhutňování asfaltových směsí, praktické stanovení vlivu teploty a hutnicí energie na mechanicko-fyzikální vlastnosti asfaltové směsi, posouzení konstrukce vozovky programem Laymed TP 170

Seznam doporučené literatury:

Pokládka hutněných asfaltových směsí (Václav Hanzík a kolektiv)

Softwarový nástroj HAV

Příslušné normy a technické předpisy

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. P. Mondschein, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 18.2.2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 26.5.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

25-02-2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Technologické zásady pokládky ovlivňující kvalitu hotových vrstev vypracoval samostatně pouze za odborných konzultací s vedoucím bakalářské práce p. Ing. Petrem Mondscheinem, Ph.D. a pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební.

Dále prohlašuji, že jsem uvedl všechny použité informační prameny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

Jiří Fikar



Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Petrovi Mondscheinovi, Ph.D., za odborné rady, za pomoc, za čas strávený konzultacemi a za vedení mé bakalářské práce. Mé poděkování náleží také všem ostatním zaměstnancům silniční laboratoře Fakulty stavební a obalovně Klecany EUROVIA CS, a.s., která mi poskytla asfaltovou směs ke zkoumání.



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou technologických zásad pokládky ovlivňující kvalitu hotových vrstev. Teoretická část popisuje hutnění asfaltových vrstev a parametry, které ji ovlivňují. Praktická část potom zkoumá vliv různých použitých hutnících energií a různých teplot hutnění směsi při pokládce na vlastnosti směsi. Jsou zde popsány postupy výroby zkušebních těles, průběhy jednotlivých zkoušek a jejich výsledky. Výsledky při jednotlivých použitých hutnících energiích a teplotách jsou následně porovnány se snahou o vyvození závislosti jejich použití na kvalitě vrstvy. Cílem této práce je poukázat na důležitost dodržování předepsaných technologických zásad.

Klíčová slova

Pokládání, teplota, zhutnění, míra zhutnění, úder



ABSTRACT

Theme of this bachelor thesis is Influence of technological principles of laying asphalt over layer quality. The theoretical part is dealing with compacting of the layer itself and with parameters of compacting. The practical part investigates the influence of different compact energy and different temperature of mixture during the compacting over attributes of asphalt. It describes procedures of manufacturing testing specimens, process of testing and results of these tests. Then results of using different compact energy and different temperature are compared with each other to create dependency of their using on the quality of the layer. The objective of this thesis is showing the importance of prescribed technological principles.

Key words:

Laying, temperature, compacting, compact rate, hit



Obsah

1	Úvod	8
2	Parametry ovlivňující kvalitu pokládané asfaltové vrstvy	9
2.1	Požadavky na podkladní vrstvu	9
2.2	Požadavky na počasí během pokládání	9
2.3	Požadavky na výrobu směsi	9
2.4	Požadavky na dopravu	9
2.5	Požadavky na rozprostírání	10
2.6	Požadavky na hutnění	11
2.7	Požadavky na zdrsnění a úpravu povrchu	11
3	Zhutnění asfaltové vrstvy	12
3.1	Proces zhutňování	12
3.2	Parametry ovlivňující zhutnění	12
3.3	Chladnutí asfaltové vrstvy během pokládání	13
3.3.1	Bossemyerova metoda	14
3.3.2	Metoda TRRL	16
3.4	Předhutnění	16
3.5	Hutnící stroje	17
3.5.1	Statické válce	18
3.5.2	Pneumatické válce	18
3.5.3	Válce s dynamickými účinky	19
3.5.4	Kombinované válce	20
3.6	Fáze hutnění	20
3.7	Závady při hutnění	21
3.8	Kvalita zhutnění	21
4	Praktická část	23
4.1	Asfaltová směs	23
4.2	Výroba zkušebních těles pomocí rázového zhutňovače	23
4.3	Objemová zkouška	24
4.3.1	Postup zkoušky	24
4.3.2	Výsledky zkoušky	25
4.4	Tuhost	29
4.4.1	Postup zkoušky	29
4.4.2	Výsledky zkoušky	31
4.5	Marshallova zkouška	39
5	Závěr	45
6	Seznam použité literatury	46
7	Seznam obrázků a tabulek	47



7.1	Seznam obrázků	47
7.2	Seznam tabulek	48
8	Přílohy	49
8.1	Seznam příloh	49



1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá technologickými zásadami pokládky ovlivňující kvalitu hotových vrstev, které jsou popsány v normě ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutnění asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody [1]. V praxi na stavbě se tyto předepsané technologické zásady mnohdy z různých důvodů nedodržují. Cílem mé bakalářské práce je poukázat na důležitost těchto zásad.

Teoretická část přibližuje pokládku asfaltových vrstev se zaměřením na jejich zhutnění. Jsou zde uvedeny parametry ovlivňující kvalitu pokládané vrstvy, samotný proces zhutňování a průběh ochlazování asfaltové vrstvy. Dále jsou zde uvedeny nejčastěji využívané typy hutnicích strojů a jejich princip, fáze hutnění, závady zapříčiněné hutněním a kvalita hutnění.

V praktické části je v laboratoři zkoumáno nedodržení dvou z těchto parametrů na chování směsi ACL 16 S 50/70. Jde o nedodržení předepsané hutnicí energie, která je simulována pomocí různého počtu úderů rázového zhutňovače, a nedodržení teploty asfaltové vrstvy při jejím rozprostírání. Ta je namodelována snížením teploty asfaltové směsi při zhutňování rázovým zhutňovačem. Na takto vytvořených vzorcích je následně prováděna Marshallova zkouška a měření modul tuhosti. Tyto výsledky jsou v závěru každé zkoušky porovnávány s výsledky u těles, které byly vyrobeny při normou předepsané hutnicí energii a teplotě směsi.



2 Parametry ovlivňující kvalitu pokládané asfaltové vrstvy

Pro zajištění toho, aby měla pokládaná asfaltová vrstva navržené vlastnosti je potřeba při stavebních pracích dodržovat několik podmínek. Při jejich nedodržení dochází k jejímu znehodnocení, snížení kvality a hlavně životnosti. Norma ČSN 73 6121 [1] mezi tyto podmínky řadí požadavky na podkladní vrstvu, požadavky na počasí během pokládky, výrobu směsi, dopravu, rozprostírání, hutnění, zdrsnění a úpravu povrchu.

2.1 Požadavky na podkladní vrstvu

Jako podkladní vrstva může sloužit směs stmelená hydraulickými pojivy, směs z nestmeleného kameniva, prolévaná vrstva, stará asfaltová vozovka, cementobetonový kryt nebo dlážděný kryt. Podkladní vrstva musí mít dostatečnou šířku a přesah, aby se na ní dala realizovat další vrstva. Musí být postavena podle příslušných norem. Rekonstruované vozovky musí být zbaveny nerovností, výtluků, trhlin a jiných trvalých deformací. Před pokládkou musí být podkladní vrstva očištěna od nečistot. Při spojování jednotlivých asfaltových vrstev by měl být použit spojovací postřík, na který se může další vrstva pokládat až po vyštěpení emulze. Na novou asfaltovou vrstvu se smí pokládat až při jejím ochlazení přibližně o 40 °C.

2.2 Požadavky na počasí během pokládání

Při pokládání asfaltové směsi nesmí pršet, ani se na podkladní vrstvě nesmí vyskytovat souvislá vrstva vody, sněhu, nebo ledu. *Minimální teploty vzduchu musí odpovídat hodnotám v tabulce 1. Asfaltové směsi pro třídy dopravního zatížení S, I, II lze pokládat pouze při rychlosti větru do 7,5 m/s (čerstvý až silný vítr) [1].*

Asfaltová vrstva	Při pokládce [°C]	Průměrné za posledních 24 hod. [°C]
Podkladní	±0	-
Ložní s nemodifikovaným pojivem	+3	-
Obrusná; ložní s modifikovaným pojivem	+5	+3
Obrusná do 30 mm včetně; vrstvy PA	+10	+5

Tabulka 1 – Minimální teploty vzduchu při pokládce [1]

2.3 Požadavky na výrobu směsi

Při výrobě asfaltových směsí se musí dodržovat příslušné normy. Směs musí být vyrobena jako homogenní tak, aby byla obalena všechna zrna, musí být správně skladována a jsou stanoveny minimální i maximální teploty pro celý areál obalovny. Aby byla zajištěna co nejvyšší kvalita pokládky, měla by obalovna vědět o všech podrobných požadavcích na asfaltovou směs a komunikovat se stavbyvedoucím.

2.4 Požadavky na dopravu

Při dopravě je nejdůležitější, aby asfaltová směs moc neochladla a neznečistila se. Na dopravu směsi má vliv vzdálenost obalovny od staveniště, aktuální teplota ovzduší, vítr, srážky, rychlost jízdy a zakrytí směsi, které se nejčastěji provádí pomocí plachet. Velkou chybou je chránit asfaltovou vrstvu zasypaním pískem. Dále by korba vozu měla být zevnitř opatřena prostředky proti nalepení asfaltové směsi, ale nemělo by se k tomu užívat nafty ani benzínu. Vzdálenost staveniště by měla být do 2 hodin jízdy. *Přibližně lze u nákladních vozidel počítat*



s průměrným ochlazením směsi 10 °C za hodinu, u speciálně izolovaných přepravníků asi 5 °C za hodinu. [2] Nejrazantnější ochlazení nastává v horních 30 až 50 cm vrstvy. Při dopravě směsi na velké vzdálenosti se doporučuje použít speciálně izolovaných vozidel. [2]

Při dopravování směsi na staveniště by mělo být k dispozici dostatečné množství automobilů, aby byla zaručena plynulost pokládky. Požadovaný počet vozidel lze stanovit podle níže uvedeného vzorce [2].

$$n = \frac{t * Q}{60 * o}$$

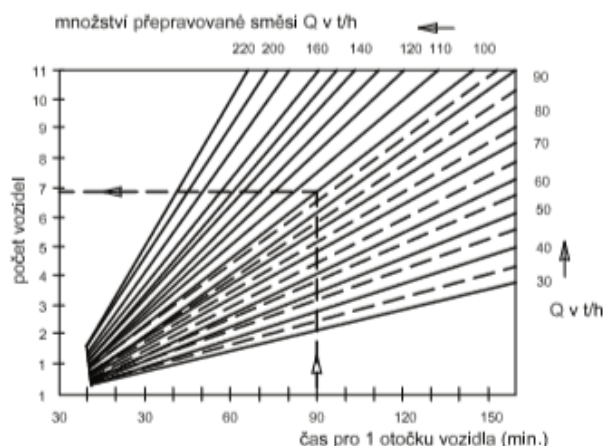
kde je

Q množství přepravované směsi (t/h);

t čas potřebný pro jednu „otočku“ dopravního prostředku (plnění a vyprazdňování, jízda k finišeru a zpět, ztrátové časy) (min);

o kapacita (užitný obsah) dopravních prostředků

nebo pomocí nomogramu (Obrázek 1).



Obrázek 1 - Nomogram pro stanovení počtu dopravních prostředků stejné kapacity [2]

2.5 Požadavky na rozprostírání

Volba strojů pro rozprostírání by měla hledět na rozměry dané komunikace. Pokládání asfaltových vrstev na liniových stavbách musí být s co nejmenšími prodlevami a mělo by se co nejvíce omezit ruční rozprostírání. Při jakémkoli zastavení finišeru by měl pracovní spoj být zhutněn příčným pojezdem válce. Vzdálenost podélných i příčných spojů v na sobě ležících vrstvách musí být minimálně 200 mm. V korbě finišeru se nesmí vyskytovat příliš ztvrdlé kusy směsi. Rychlost pokládání směsi se musí přizpůsobit aktuálním okolním podmínkám jako jsou teplota vzduchu, rychlost větru, vlhkost ovzduší a srážky, ale finišer by měl pokládat spíše pomaleji, aby dostatečně předhutnil rozprostíranou směs [3].



Druh asfaltové směsi	Druh asfaltu	Nejnižší přípustná teplota směsi podle tloušťky vrstvy ¹⁾²⁾ [°C]		
		do 40 mm	40 až 70 mm	70 až 100 mm
AC, BBTM, SMA	100/150 ³⁾	130	120	105
	70/100	145	130	110
	50/70	150	140	120
	30/45	175	160	140
PA, AKO	100/150 ⁴⁾	100	100	-
	70/100	105	100	-
	50/70	105	100	-

¹⁾ Teplota směsi se měří v místě rozdělovacího šneku finišeru.
²⁾ Teplotu směsi při použití nízkoteplotního asfaltu, modifikovaného asfaltu a při použití dalších přísad stanovuje výrobce asfaltu nebo přísady.
³⁾ Platí poznámka č. 2 z tabulky 5 této normy.
⁴⁾ Pojivo 100/150 se používá pouze pro AKO.

Tabulka 2 – Teploty asfaltové směsi při jejím rozprostírání [1]

2.6 Požadavky na hutnění

Výběr hutnícího stroje se musí přizpůsobit požadovanému předepsanému zhutnění a hutněné směsi. K hutnění by mělo dojít při co nejvyšších teplotách směsi. Při nedostatečně odborném hutnění není dosaženo požadované objemové hmotnosti směsi, což je příčinou mnoha poruch.

Průběh hutnění	Druh asfaltu				
	Nemodifikovaný		Modifikovaný PMB ²⁾		
	50/70; 70/100; 100/150	30/45	45/88-50	22/55-60; - 65; 45/80-65; 10/40-65	45/80-75; 40/100-65
Ukončení hutnění s vibrací	100 °C	105 °C	105 °C	110 °C	120 °C
Ukončení hlavního ¹⁾ hutnění	75 °C	80 °C	85 °C	90 °C	100 °C

¹⁾ Bez závěrečné fáze hutnění (uhlazení, žehlení).
²⁾ Teplotu směsi při použití nízkoteplotního asfaltu, asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem ve variantě „N“ a při použití dalších přísad stanovuje výrobce pojiva nebo přísady.

Tabulka 3 – Doporučené teploty pro hutnění asfaltových směsí [1]

2.7 Požadavky na zdrsňování a úpravu povrchu

Pro dosažení navržených protismykových vlastností se používá zdrsňující posyp z neobaleného nebo předobaleného kameniva frakce 2/4 nebo 2/5 s minimální ohladitelností kameniva. V obrusné vrstvě musí být také vodonepropustné pracovní spáry.



3 Zhutnění asfaltové vrstvy

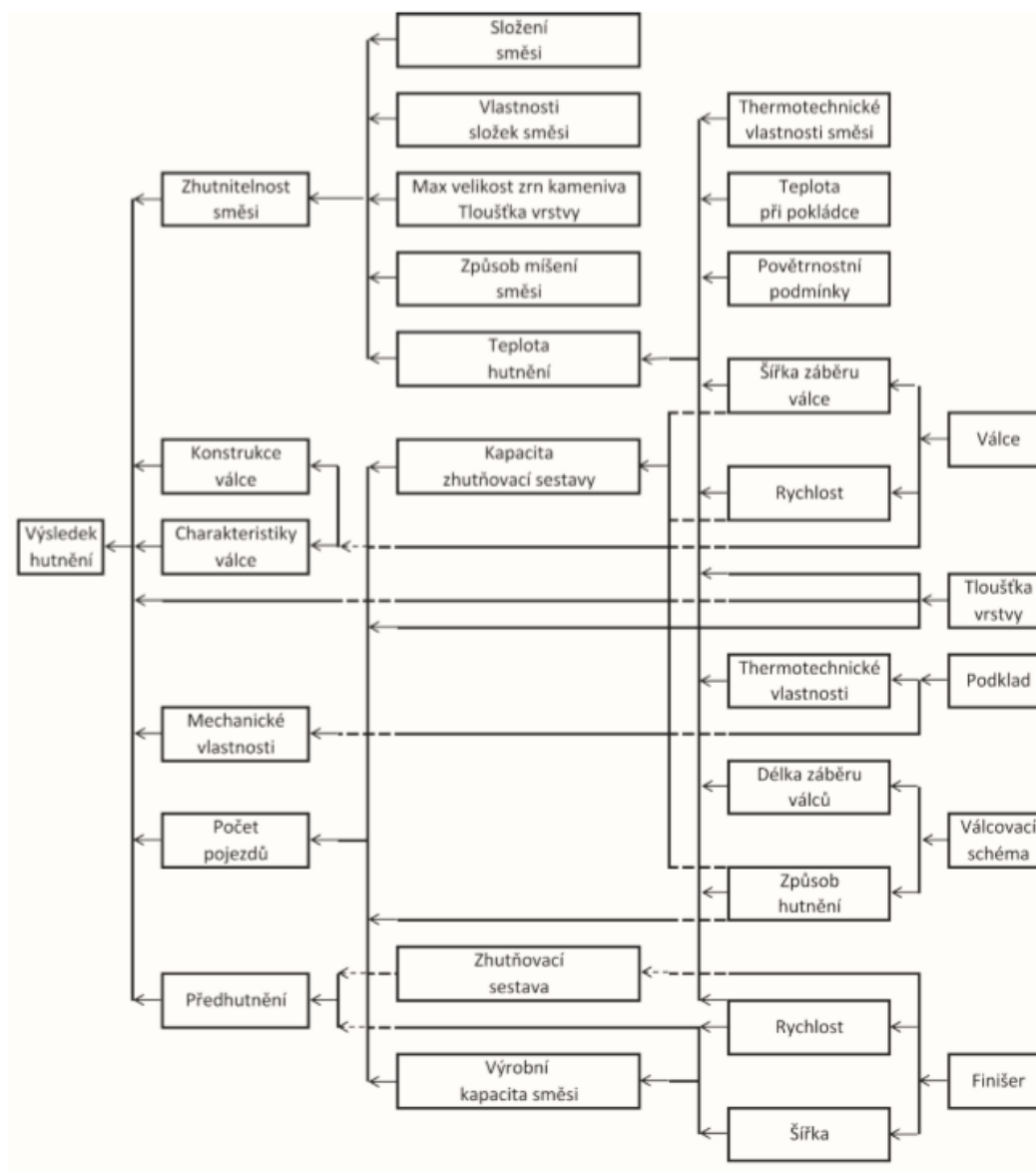
3.1 Proces zhutňování

Zhutňování je jedním ze dvou hlavních činností při pokládce asfaltové vrstvy, tou druhou je její rozprostírání. Hutnění je proces, který asfaltové vrstvě má zajistit díky správnému uspořádání částí směsi požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti a co nejdelší životnost [2].

U většiny směsí platí, že s rostoucí mírou zhutnění roste zároveň její pevnost, tuhost, odolnost proti únavě a životnost. Tato vlastnost neplatí pouze u směsí s velmi nízkou mezerovitostí, kde při rostoucí míře zhutnění klesá tuhost.

3.2 Parametry ovlivňující zhutnění

Parametrů, které ovlivňují kvalitu zhutňování, je v souhrnu velké množství a tato činnost, i když se zdá být poměrně jednoduchá, je při nárocích na řádné provedení značně komplexní. Pro představu této komplexnosti je na Obrázku 2 uveden graf faktorů, které hutnění ovlivňují.



Obrázek 2 – Komplexní přehled faktorů ovlivňujících výsledek hutnění [2]



Mezi ty nejzásadnější parametry pro kvalitní zhutnění patří ty, které vstupují do Nijboerova vzorce pro zhutňovací faktor, který je uveden níže.

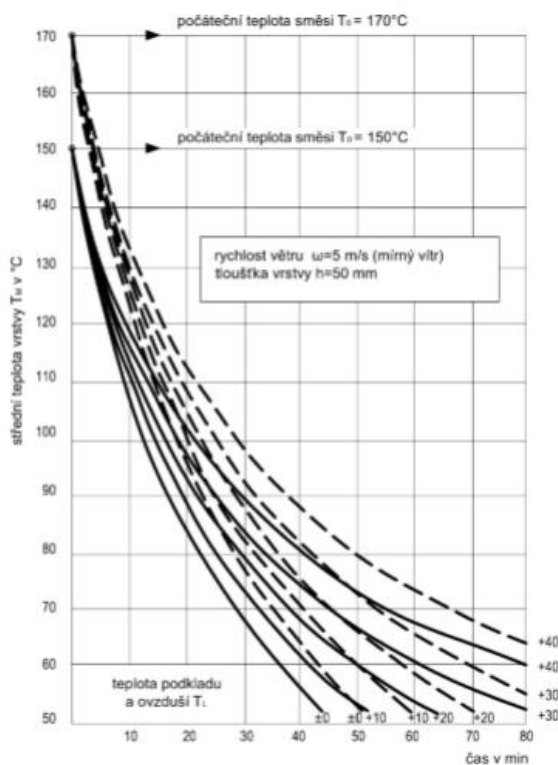
$$R_f = 10^4 \frac{C_w - c * \tau_{ch}}{\eta_m} * n * \left(\frac{h}{v_v}\right)^{0,4}$$

kde je

- R_f Zhutňovací faktor podle Nijboera
- C_w koeficient účinnosti běhounu nebo kola válce [N/mm²]
- C charakteristická konstanta typu běhounu [-]
- τ_{ch} Nijboerova počáteční tuhost asfaltové směsi při zhutňování [N/mm²]
- η_m viskozita asfaltové směsi podle Nijboera [Pa*s]
- n počet pojezdů válce [-]
- h tloušťka vrstvy [m]
- v_v rychlost pojezdu válce [m/s]

3.3 Chladnutí asfaltové vrstvy během pokládání

Jedním ze stěžejních parametrů, které ovlivňují kvalitu zhutnění je teplota asfaltové vrstvy při hutnění. Hutnění při různých teplotách směsi je jeden ze dvou parametrů, které se v této bakalářské práci zkoumají v praktické části. V praxi se problém ochlazování směsi dá popsat nejen experimentálně, ale také matematicky. Dokonce se matematické metody prokázaly jako přesnější. Z těchto metod jsou nejčastěji využívány dvě, a to metoda Bossemeyerova a metoda TRRL [2].



Obrázek 3 – Průběh ochlazování asfaltové vrstvy [7]



3.3.1 Bossemeyerova metoda

Podle Bossemeyerovy metody je ochlazování asfaltové vrstvy závislé hlavně na počáteční teplotě položené směsi, teplotě podkladu a ovzduší, rychlosti větru, tloušťce vrstvy a fyzikálních vlastnostech dané směsi. *Základem této metody je výpočet průměrné (střední) teploty asfaltové vrstvy T_M (°C) ze vzorce [2].*

$$T_M = \frac{e^{-0,38 \cdot \frac{\tau}{\xi_R}}}{1 + 0,73 \cdot \sqrt[4]{\frac{\tau}{\xi_R^3}}} * (T_0 - T_L) + T_L$$

kde je

T_0 počáteční teplota směsi (vrstvy) po rozprostření (°C),

T_L průměrná teplota podkladu a ovzduší (°C)

ξ_R, τ pomocné početní veličiny určené z následujících rovnic

$$\xi_R = \frac{\lambda}{\alpha * h}$$

$$\tau = z * t$$

$$z = \frac{7,2 * \lambda}{c * \rho_A * h^2}$$

kde je

λ součinitel tepelné vodivosti pokládané vrstvy (W/m*K);

α součinitel přestupu tepla (W/m²*K);

h tloušťka ochlazované vrstvy (m);

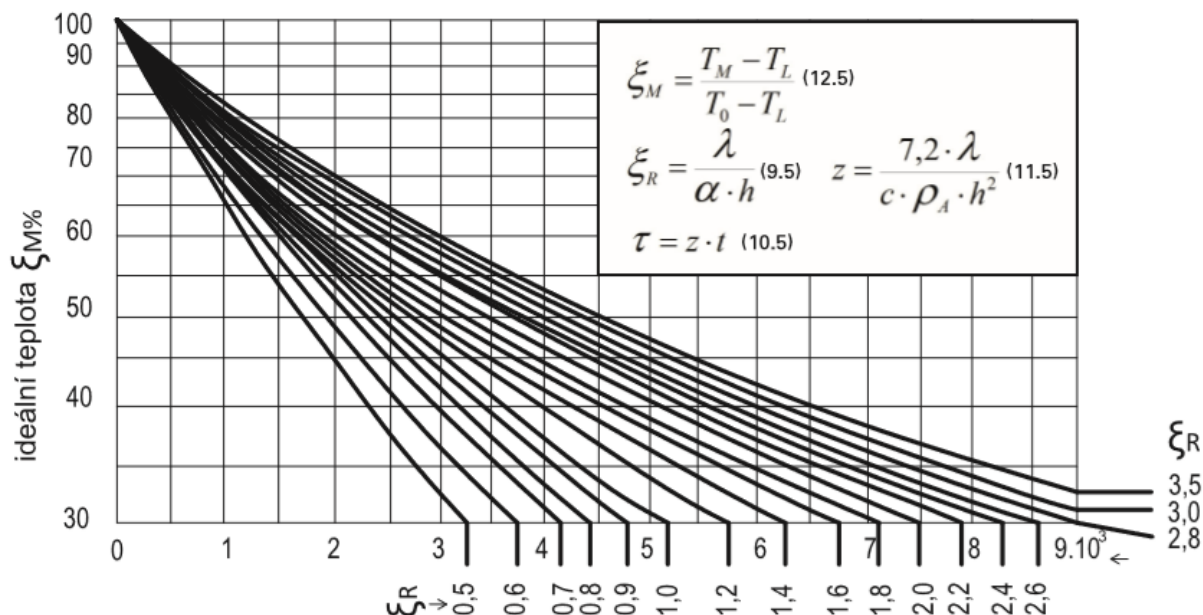
t čas (h);

c měrná tepelná kapacita vrstvy (kJ/kg*K);

ρ_A průměrná objemová hmotnost pokládané vrstvy v průběhu pokládky (kg/m³);

z pomocná výpočetní hodnota pro ochlazování asfaltové vrstvy

Nebo lze pro zjednodušení výpočtu využít graf (Obrázek 4) [2].



Obrázek 4 – Graf pro stanovení doby ochlazení

kde je

T_M průměrná (střední) teplota asfaltové vrstvy (°C);

T_0 počáteční teplota směsi (vrstvy) po rozprostření (°C);

T_L teplota podkladu a ovzduší (°C)

Pro běžnou stavební praxi při návrhu a posouzení technologie zhutňovacího procesu lze s výhodou a dostatečnou přesností používat tzv. ochlazovací křivky, tj. závislost průměrné teploty ochlazované vrstvy na čase. [2]

Podle zpracovaných ochlazovacích křivek lze sepsat nejdůležitější parametry ovlivňující ochlazování asfaltové vrstvy při pokládce.

1. Vliv teploty ovzduší a podkladu při pokládce

Vyšší teploty ovzduší a podkladu při pokládce prodlužují časy použitelné pro zhutňování.

2. Vliv rychlosti větru

Čas použitelný pro zhutňování se při vyšších rychlostech větru značně zkracuje.

3. Vliv tloušťky vrstvy

Tloušťka vrstvy je nejmarkantnější parametr při ochlazování vrstvy. Zvětšování tloušťky vrstvy značně prodlužuje časy použitelné pro zhutňování, nejvíce u tenkých vrstev.

4. Vliv počáteční teploty směsi

Časy použitelné pro zhutňování se díky vyšším teplotám také zvyšují. Při zvýšení teploty o 10 °C vzroste čas použitelný pro zhutnění přibližně o 10 %. [2]

Jedním z nedostatků takto popsané Bossemeyerovy křivky je, že neuvažuje s působením slunečního záření. Tento fakt by se mohl často projevovat při pokládce v letních měsících, a jelikož v této době probíhá mnoho silničních stavebních prací, zavedl se pro zpřesnění výpočtu korekční postup.



3.3.2 Metoda TRRL

Britská metoda Transport and Road Research Laboratory popisuje ochlazování asfaltové vrstvy při pokládce pomocí následujícího vzorce. [2]

$$\log T = \log T_0 - m * t$$

kde je

T teplota uprostřed pokládané vrstvy v čase t po rozprostření (°C);

T_0 počáteční teplota směsi (vrstvy) po rozprostření (°C);

t čas od rozprostření směsi (min);

m konstanta závislá na tloušťce pokládané vrstvy a povětrnostních podmínkách.

V praxi se tato rovnice používá hlavně pro výpočet času použitelného pro hutnění dle rovnice

$$t_c = F_c * F_l * F_d * F_{SR}$$

kde je

F_c faktor povětrnostních podmínek, určí se podle rychlosti větru a teploty ovzduší ve stínu dle tabulky

F_l teplotní faktor; určí se z tabulky 3.5 podle počáteční teploty směsi (vrstvy) po rozprostření T_0 (°C) a požadované teploty uprostřed vrstvy na konci hutnění T_c (°C)

F_d korekční faktor tloušťky pokládané vrstvy; určí se z tabulky

F_{SR} korekční faktor vlivu přímého slunečního záření; určí se z tabulky nebo obrázku v závislosti na teplotním rozdílu ΔT tj. rozdílu mezi teplotou při povrchu podkladu a teplotou ovzduší ve stínu

3.4 Předhutnění

V závislosti na technologii pokládky lze dosáhnout značné míry zhutnění již při pokládce. Asfaltovou vrstvu lze rozprostírat ručně, grejdry, finišery bez vibrací a dusání, nebo finišery s vibracemi a dusáním. Běžné finišery bez vibrace a dusání jsou schopné dosáhnout míry předhutnění okolo 80 procent, ale některé moderní finišery s vibrací a dusáním jsou schopné dosáhnout normou požadované míry zhutnění (v závislosti na směsi, přibližně 97 %) samy, bez použití dalších hutnících prostředků [2].

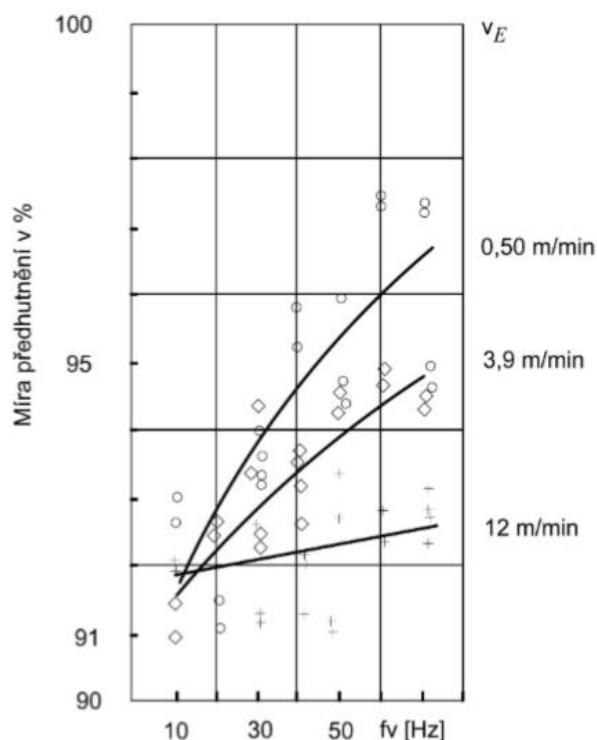
Rozprostírání	Míra předhutnění směsi	Koeficient nadvýšení
Ruční, grejdry	75 %	1,33
Finišery (bez předhutnění)	80 %	1,25
Finišery (s vibrací a dusáním)	85–90 %	1,11 - 18

Tabulka 4 – Míra předhutnění směsi a koeficient nadvýšení v závislosti na technologii pokládky [4]

Míra předhutnění není závislá jen na samotném stroji a jeho technické specifikaci, ale také na správně zvoleném průběhu práce. Konkrétně na rychlosti pokládky, kde se zvyšující se rychlostí klesá míra předhutnění, frekvenci vibrační hladicí desky a velikosti jejího odstředivého momentu, kde se se zvyšováním frekvence a zvětšováním odstředivého momentu míra předhutnění zvyšuje, a frekvenci a výšce zdvihu hutnícího pěchu, kde se s větší frekvencí a výškou zdvihu také zvětšuje míra předhutnění. Tyto parametry jsou ale většinou ovlivňovány dalšími faktory, jako je rychlost dopravy směsi na staveniště, typ směsi



a její tloušťka, a proto ne vždy je možné je nastavit tak, aby bylo dosaženo největší možné míry předhutnění [2].



Obrázek 5 – Vliv rychlosti pojezdu finišeru a frekvence vibrace na míru předhutnění [7]

Díky vyšší míře předhutnění je zároveň možné snížit podíl zhutňovacích prací válců, válce mohou začít zhutňovat za vyšších teplot směsi a vady zapříčiněné válci vznikají méně často. Dále je díky vyšší míře předhutnění možné dosáhnout větších tuhostí pokládané vrstvy, lepší rovnosti, nebo lze pokládat v méně příznivých podmínkách [2].

3.5 Hutnicí stroje

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících zhutnění jsou samy hutnicí stroje. V dnešní době je možné velkou část hutnění provádět již samotným finišerem, technologie ještě ale nedospěla tak daleko, aby se hutnění asfaltových vrstev vždy obešlo bez válců. Válce lze rozdělit do 4 kategorií: Statické, pneumatické, s dynamickými účinky a kombinované.



3.5.1 Statické válce

Proces zhutňování pomocí statického válce je způsoben tíhou samotného válce. Ta se pohybuje v rozmezí od 1 do 15 t. Mimo hmotnost válce jsou dalšími základními parametry šířka a průměr běhounu, statické lineární zatížení, konstrukční uspořádání válce a optimální pracovní rychlost. Válce s většími průměry běhounu zaručí větší rovnost vrstvy, zatímco válce s menšími průměry zase dosahují lepší míry zhutnění. Válce s úzkými běhouny občas tvoří rýhy, na druhou stranu válce s běhouny širšími nedokáží vždy rovnoměrně zhutnit daný pruh [2]. Tyto válce nedosahují vysokých hutnících účinků, plné zhutnění u nich nastává maximálně do hloubky vrstvy 8 cm. Vhodné jsou maximálně do sklonů 14 % a doporučená rychlost válce při hutnění nepřesahuje 4 km/h [4].



Obrázek 6 – Statický válec HAMM HD 14 TT [5]

3.5.2 Pneumatické válce

Pneumatické válce se nejčastěji vyskytují s 5–11 koly na jedné ose a dosahují hmotnosti 5–35 tun. Dalšími hlavními parametry pneumatických válců jsou způsob zavěšení kol, pracovní šířka pneumatického válce, tlak vzduchu, šířka pneumatiky, rychlost pojezdu a teoretický dotykový tlak. Šířka pneumatického válce se běžně pohybuje v rozmezí 1,0–2,7 m [2]. Optimální tlak v pneumatikách je mezi 500–600 kPa. Pneumatické válce mohou pojíždět pracovní rychlostí 3–4 km/h při hutnění tlustých vrstev, nebo 7–8 km/h při uzavírání povrchů, mohou se použít i ve sklonech větších než 14 % a dokáží plně zhutnit vrstvu tlustou až 20 cm [4].



Obrázek 7 – Pneumatický válec BOMAG BW 27 RH [6]

3.5.3 Válce s dynamickými účinky

Válce s dynamickými účinky dnes patří díky své efektivnosti k nejčastěji využívaným válcům při pokládce asfaltových směsí. Hmotnost těchto válců se pohybuje mezi 1–15 tuny. Vibrační systém se může nacházet na jedné nebo na obou nápravách s tím, že frekvence a amplituda vibrací jsou nastavitelné. U tenkých vrstev do 4 cm se doporučuje volit pracovní rychlost mezi 2,5–4 km/h, u tlustších vrstev se pak doporučuje rychlost snížit na 1,5–2,5 km/h. Tento typ válců je schopen plně hutnit vrstvy tlusté až 30 cm ve sklonu do 14 % [4]. Dělí se na dva základní typy, a to válce vibrační (se svislými dynamickými účinky) a válce oscilační (s vodorovnými dynamickými účinky) [2].



Obrázek 8 – Vibrační válec BOMAG BW 206 AD-5 AM [6]



3.5.4 Kombinované válce

Kombinované válce mohou spojovat jednak různé dynamické účinky, kdy jeden hutnicí stroj využívá jak vibraci, tak oscilaci, nebo se mohou kombinovat různé typy běhounů. V tom případě se nejčastěji jedná o stroje jak s pneumatikami, tak s ocelovým běhounem. Takovéto stroje se dají využít i pro hutnění ve sklonech do 20 %, bývá u nich ale složité hledání optimálních hutnicích teplot [2].



Obrázek 9 – Kombinovaný válec BOMAG BW 161 AC – 50 [6]

3.6 Fáze hutnění

Proces zhutnění se dá rozdělit do 3 fází [4].

1. **Fáze:** Cílem této fáze je co nejintenzivněji stlačit rozprostíranou horkou směs. V této fázi se válce pohybují ve vzdálenosti 0-50 m za finišerem, konají 2-4 pojezdy, přičemž vibrační válce vykonají 2 pojezdy bez vibrací a dva s vibracemi a pneumatiké válce mají nastavený nízký kontaktní tlak.
2. **Fáze:** Druhá fáze je hlavní fáze hutnění, ve které je cílem dosáhnout požadované míry zhutnění. Válce v této fázi jezdí 50-150 metrů za finišerem a konají 4-8 pojezdů.
3. **Fáze:** Poslední fáze hutnění se také říká „žehlení“ nebo „hlazení“. V jejím průběhu se odstraňují vzniklé nerovnosti, nemělo by docházet k dalšímu zhutňování, směs by měla být pod hranicí minimální teploty pro hutnění, neměla by ale být nižší než 80 °C.



Typy válců	1. Fáze	2. Fáze	3. Fáze
Statické	Při nízkém stupni předhutnění a tloušťkách větších než 50 mm je vhodné použít lehčí válce.	Válce vyšších hmotností	Použitelné
Pneumatické	Při vysokém předhutnění, nelze použít u obrusných vrstev AK nebo při smluvních podmínkách na protismykové vlastnosti.	Použitelné	
Vibrační	S vypnutou vibrací	Použitelné	S vypnutou vibrací

Tabulka 5 – Použitelnost válců pro jednotlivé fáze

3.7 Závady při hutnění

Nejčastějšími důvody vzniku závad na pokládané vrstvě vlivem hutnění jsou obecně špatná teplota směsi, znečištěný podklad pod hutněnou vrstvou a špatná volba válce. V důsledku špatného hutnění vznikají hlavně následující problémy [2], [4]:

- 1. Hrnutí hutněné směsi před válcem:** Příčinou této závady bývá často příliš vysoká teplota hutněné směsi a nevhodně zvolený typ válce. Posouvání hutněné směsi po podkladu bývá zapříčiněno znečištěním podkladu.
- 2. Nalepování směsi na běhouny a kola válců:** Nalepování směsi bývá způsobeno hlavně nedostatečným skrácením běhounů a pneumatik, příliš vysokou teplotou asfaltové směsi, anebo nízkou teplotou povrchu pneumatik.
- 3. Zabořování běhounů a kol do hutněné směsi a její vytlačování:** Tato vada je nejčastěji způsobena příliš horkou směsí, jejím špatným složením, špatnou volbou válce, malým předhutněním, příliš velkou tloušťkou hutněné vrstvy, nebo zastavováním válce.
- 4. Příčné trhliny:** Hlavními důvody vzniku příčných trhlin bývá nedostatečné předhutnění, volba moc těžkých válců, nízká teplota povrchu vlivem větru, vody atd. a posouvání pokládané vrstvy vlivem znečištěného podkladu.
- 5. Podélné trhliny:** Nejčastějšími příčinami vzniku podélných trhlin bývá nevhodný podklad, volba moc těžkých válců, nedostatečný tlak v pneumatikách pneumatických válců a špatná manipulace s válcem.

3.8 Kvalita zhutnění

Kvalita zhutnění se vyjadřuje pomocí míry zhutnění, což je poměr objemové hmotnosti vzorku položené a zhutněné vrstvy ze stavby ku objemové hmotnosti stejné směsi vytvořené v laboratoři vyjádřené v procentech.

Míru zhutnění již položené asfaltové vrstvy lze určit pomocí vývrtu, ale i nedestruktivně, a to například radiometrickou sondou, která funguje na principu rozptylu a absorpci gama paprsků atomy měřeného materiálu, nebo ji lze kontrolovat během hutnicího procesu pomocí kompaktmtru zabudovaném v hutnicích strojích. Ten určuje míru zhutnění pomocí měření silových rázů vibrujícího bubnu, díky čemuž je na hutnicích strojích během hutnění automaticky upravována rychlost pojezdu a frekvence amplitudy, aby byla tato činnost co nejefektivnější.



Na míře zhutnění je závislá pevnost a tuhost vrstvy, odolnost vrstvy proti tvorbě trvalých deformací, vodonepropustnost vrstvy a odolnost vrstvy proti klimatickým vlivům. Kvůli výše uvedeným důvodům je v této bakalářské práci míře zhutnění věnována pozornost v kapitole 4.3.2. Samotné hutnění dále ovlivňuje povrchové vlastnosti jako jsou rovnost, povrchová pevnost, drsnost a odolnost proti obrušování [7].



4 Praktická část

V praktické části této bakalářské práce bylo v silniční laboratoři zkoumáno nedodržení dvou technologických zásad: nedodržení teploty směsi při hutnění a nedodržení hutnicí energie. Na takto vytvořených tělesech bylo provedeno stanovení zhutněné objemové hmotnosti, Marshallova zkouška a byl stanoven modul tuhosti.

4.1 Asfaltová směs

Změny vlastností při nedodržování technologických zásad byly zkoumány na asfaltové směsi ACL 16 S 50/70 – Asfaltový beton pro ložné vrstvy s maximální velikostí zrna 16 mm v té nejvyšší kvalitě se silničním asfaltem 50/70. Tato směs byla vyrobena v obalovně Klecany EUROVIA CS, a.s.

4.2 Výroba zkušebních těles pomocí rázového zhutňovače

Tělesa se připravovala podle normy ČSN EN 12697-30 OPRAVA 1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem [8].



Obrázek 10 - Marshallův pěch infraTest

Nejdříve byla vyhotovena tělesa podle předepsané normy – horká směs se navážila do fanek tak, aby v každé bylo cca 1150 gramů. Takto navážená směs se dala ohřívat do sušárny s termostatem na předepsanou teplotu hutnění 155 °C. Mezitím se nahřála podložka, válcová forma o vnitřním průměru $101,6 \pm 0,1$ mm a nástavec pro rázový zhutňovač. Na nahřátou podložku se položil papírový filtr, nasadila se válcová forma, nástavec, nasypala se vytemperovaná směs, srovnal se vrchní povrch a přikryl dalším papírovým filtrem. Tato soustava se co nejrychleji vložila do hutnicího zařízení, upevnila se a z každé strany se hutnila 75 úderů. K hutnění byl použit Marshallův pěch značky infraTest s ocelovým dolním podstavcem. Poté se soustava vyndala z hutnicího zařízení, odejmuly se filtry a takto

vytvořené těleso ve formě se dalo chladnout na válcovou podložku. Po vychladnutí se těleso označilo a vytlačilo z formy pomocí hydraulického lisu.

Následně bylo nasimulováno nedodržení předepsané hutnící energie pomocí snížení počtu úderů pěstí. Takto byla vytvořena válcová tělesa při 2x60, 2x50 a 2x40 úderech při teplotě směsi 155°C. Tělesa hutněná 2x40 úderů byla tvořena z navážky o hmotnosti cca 1100 g. V každé skupině hutnění bylo vyrobeno 11 těles.

Nedodržení teploty asfaltové vrstvy při rozprostírání bylo namodelováno postupným snížením teploty směsi při hutnění na 145, 135, 125 a 115 °C při 2x75 úderech. U každé z těchto teplot byly vytvořeny 4 tělesa. Při teplotě 125 °C se už směs lepila k fankám, byla velmi tuhá a špatně se s ní manipulovalo.

Počet úderů	Teplota [°C]	Počet vyrobených těles
2x75	155	11
2x75	145	4
2x75	135	4
2x75	125	4
2x75	115	4
2x60	155	11
2x50	155	11
2x40	155	11

Tabulka 6 – Počet vyrobených zkušebních těles



Obrázek 11 – Vyrobená zkušební tělesa

4.3 Objemová zkouška

4.3.1 Postup zkoušky

První vlastnost, která se na tělesech měřila, byla objemová hmotnost. Postupovalo se podle normy ČSN EN 12697-6 [10] dvěma způsoby, a to postupem „Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD)“ a „Objemová hmotnost podle rozměrů – Válcové zkušební těleso“.

Pro oba způsoby bylo nejprve potřeba stanovit rozměry vyhotovených těles. To se provádělo podle normy ČSN EN 12697-29 [11]. Na tělesech se pomocí digitální šuplery měřila výška ve 4 místech rovnoměrně od sebe vzdálených a dále průměr ve dvou místech, která na sebe byla navzájem kolmá. Z takto získaných rozměrů se nadále využíval jejich aritmetický průměr.



Dále byla pro získání objemové hmotnosti tělesa vážena. Nejdříve se zvážila tělesa suchá, poté se tělesa ponořila přibližně na 45 minut do vodní lázně o známé teplotě. Takto připravená tělesa se následně zvážila, osušila vlhkou jelenicí a zvážila potřetí.

Z takto získaných hodnot se vypočetla objemová hmotnost pomocí vzorců:

Postup: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD)

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

kde je

ρ_{bssd} objemová hmotnost SSD v Mg/m³

m_1 hmotnost suchého zkušební tělesa v g

m_2 hmotnost zkušební tělesa ve vodě v g

m_3 hmotnost zkušební tělesa nasyceného vodou a povrchově usušeného v g

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě v Mg/m³

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{7,59 * t - 5,32 * t^2}{10^6} \right)$$

kde je

t teplota vody ve °C

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě v Mg/m³

Postup: Objemová hmotnost podle rozměrů – Válcové zkušební těleso

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} * 10^3$$

kde je

$\rho_{b,min}$ objemová hmotnost zkušební tělesa podle rozměrů v Mg/m³

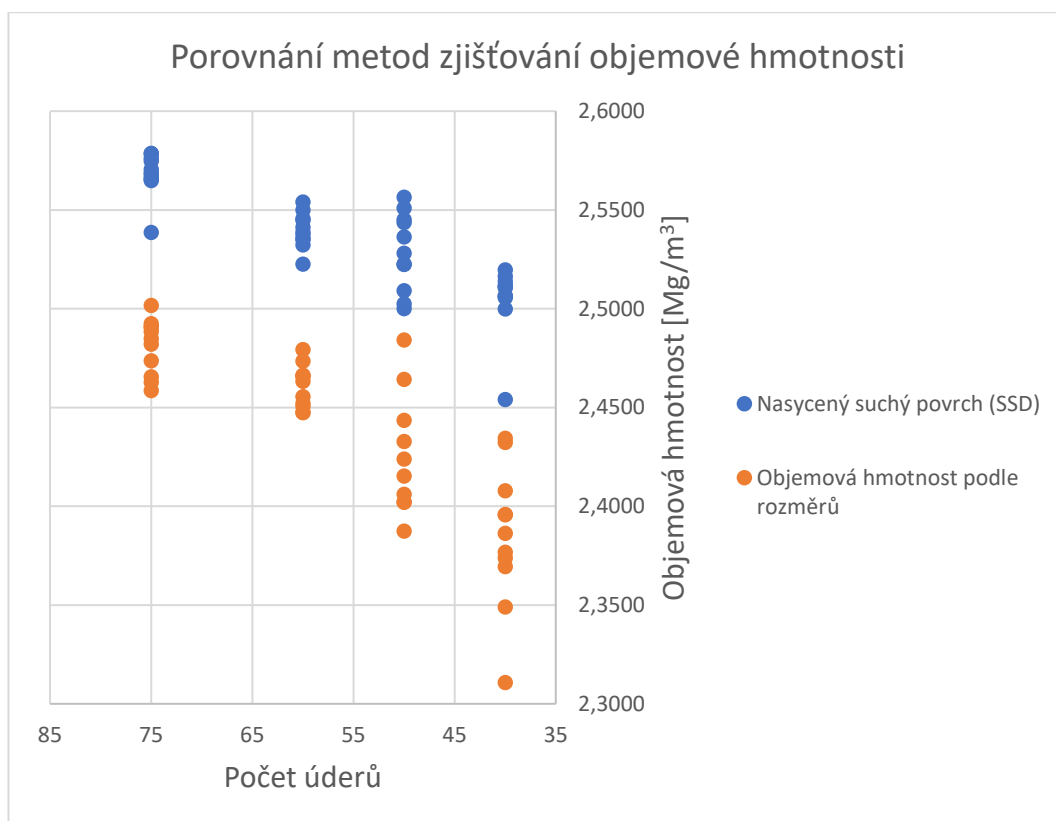
m_1 hmotnost suchého zkušební tělesa v g

h výška zkušební tělesa v mm

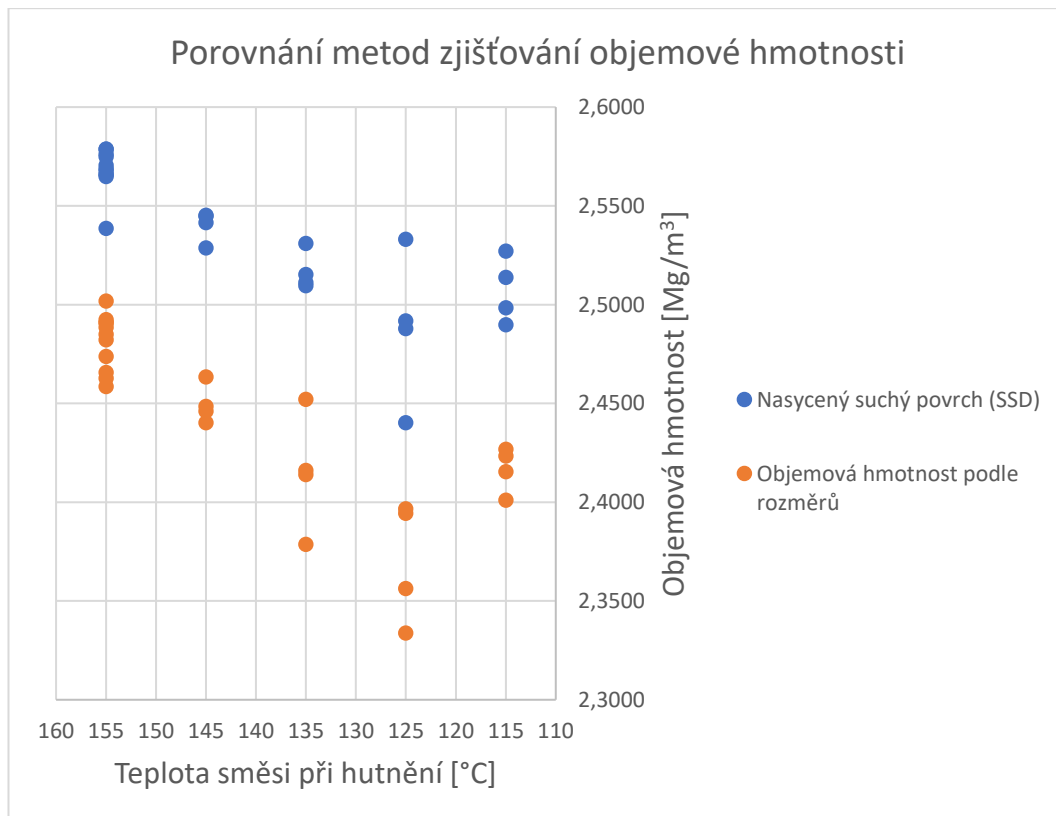
d průměr zkušební tělesa v mm

4.3.2 Výsledky zkoušky

Z výsledků obou metod byl vyhotoven graf závislosti teploty směsi, při které byly hutněny, na objemové hmotnosti a graf závislosti počtu úderů Marshallova pěchu na objemové hmotnosti. Jelikož se ale výsledky jednotlivých metod lišily, dále se pracovalo pouze s výsledky Objemové zkoušky – nasycený suchý povrch (SSD) z důvodu její větší přesnosti. Srovnání výsledků obou zkoušek je vyobrazeno na *Obrázcích 12 a 13*.



Obrázek 12 - Graf závislosti objemové hmotnosti na počtu úderů Marshallova pěchu – porovnání jednotlivých metod výpočtu



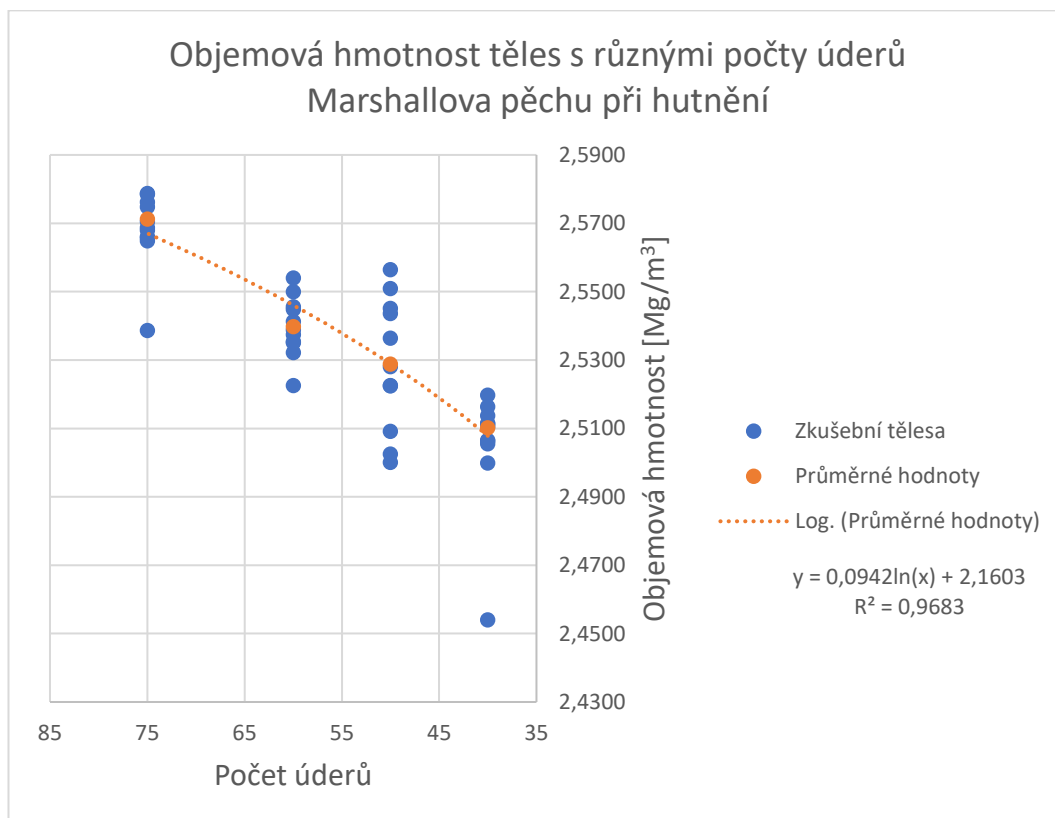
Obrázek 13 - Graf závislosti objemové hmotnosti těles na teplotě směsi při hutnění – porovnání jednotlivých metod výpočtu



Na základě *Obrázku 14 - Graf závislosti objemové hmotnosti a počtu úderů Marshallova pěchu* lze předpokládat, že jedno těleso hutněné 75 úderů a jedno těleso hutněné 40 úderů se při hutnění zapomnělo otočit, a proto jsou jejich objemové hmotnosti tak odlišné od zbytku těles hutněných stejným počtem úderů. Tato dvě tělesa byla proto vyřazena ze všech následujících zkoušek.

V tomto grafu je také zobrazena spojnice trendu průměrných hodnot. Nejlépe hodnoty kopíroval logaritmický trend se vzorcem uvedeným níže.

$$y = 0,0942 \ln x + 2,1603$$



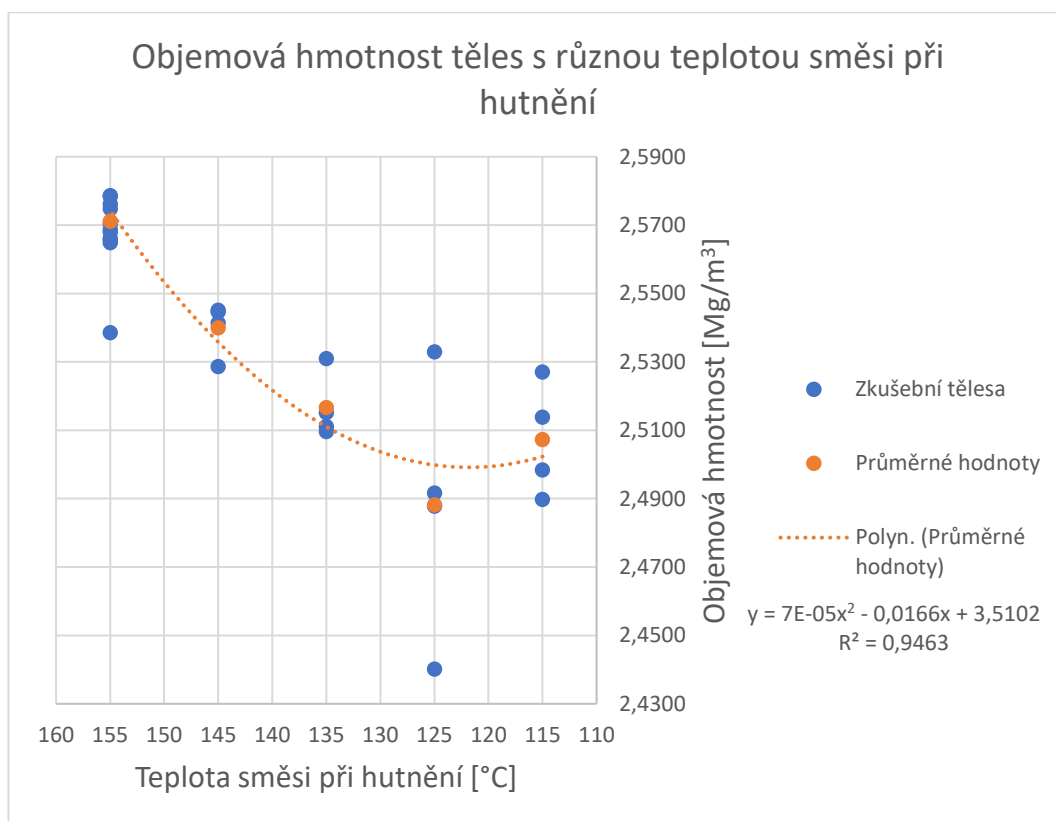
Obrázek 14 – Graf závislosti objemové hmotnosti a počtu úderů Marshallova pěchu

V *Obrázku 15 - Graf závislosti objemové hmotnosti těles na teplotě směsi při hutnění* lze pozorovat mnohem větší rozdíl naměřených hodnot u jednotlivých těles se stejnou teplotou směsi. Tento jev lze vysvětlit nepřesností měření teploty před hutněním. Jelikož bylo při různých teplotách směsi vyrobeno méně těles a jelikož jsou odchylky na obě strany, tak pro výpočet průměrů nebyla žádná tělesa odstraněna.

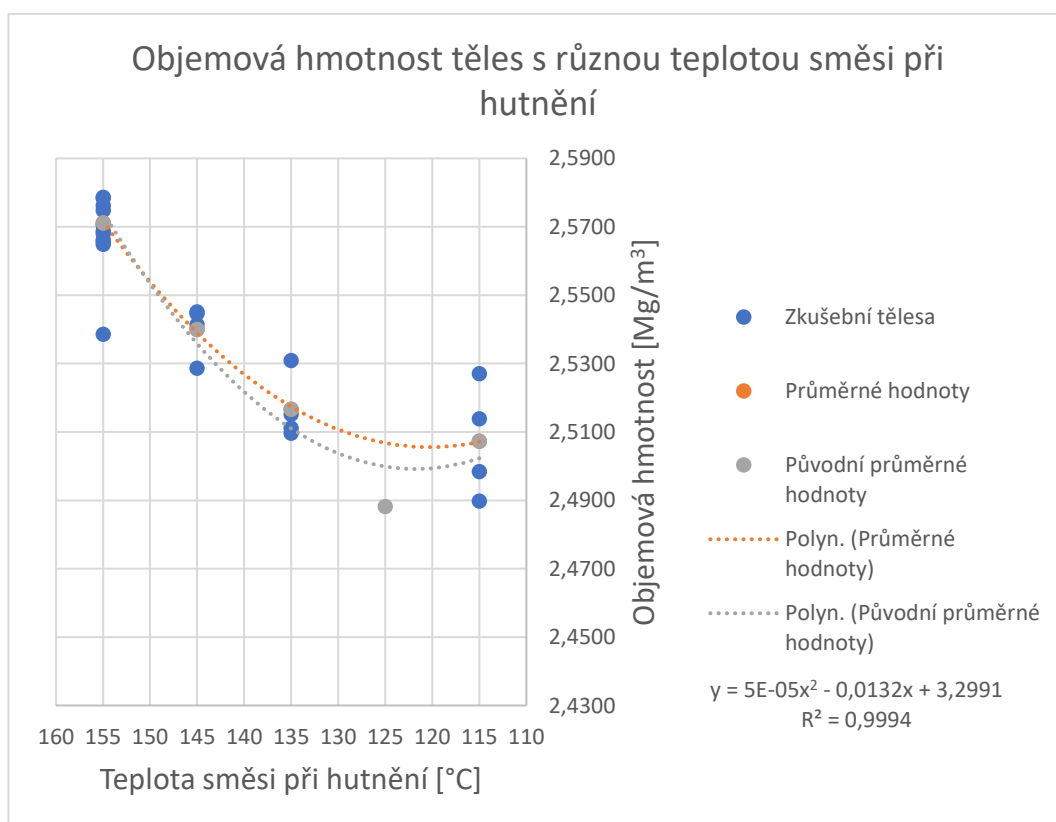
Spojnice trendu této závislosti nejlépe vystihuje polynomičká rovnice uvedená níže. Z grafu je jasné vidět, že pomyslný vrchol křivky nacházející se ve skupině těles hutněných při teplotě směsi 125 °C je způsoben značně rozdílnými hodnotami výsledků u této skupiny. Lze předpokládat, že při větším množství zkušebních těles by tento jev vymizel.

$$y = 7 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0166 \cdot x + 3,5102$$

Když se z tohoto grafu vyřadí skupina těles hutněná ze směsi o teplotě 125 °C, spojnice trendu se změní, jak je vidět na *Obrázku 16*. Tato spojnice má oproti předchozí i mnohem vyšší hodnotu spolehlivosti R. Pro názornost této změny v grafu byla ponechána i původní spojnice trendu. Zajímavostí je, že se pomyslný vrchol křivky stále pohybuje mezi hodnotami 120-125 °C.



Obrázek 15 – Graf závislosti objemové hmotnosti těles na teplotě směsi při hutnění



Obrázek 16 - Graf závislosti objemové hmotnosti těles na teplotě směsi při hutnění bez skupiny 125



Z takto vzniklých vztahů lze konstatovat, že snížení teploty směsi o 10 °C se rovná přibližně snížení o 2x20 úderů Marshallovým pěchem, nebo naopak snížení počtu úderů o 2x10 úderů se rovná snížení teploty přibližně o 5 °C.

Pro upřesnění vztahu mezi počty úderů Marshallova pěchu na objemové hmotnosti a vztahu mezi teplotou hutněné směsi a objemovou hmotností by bylo potřeba zkoušku opakovat s mnohem větším počtem těles při jemnějším kroku snižování počtů úderů a přesnější měření teploty směsi pro hutnění.

Při předpokladu, že průměrná hodnota objemové hmotnosti těles vytvořených 2x75 údery Marshallovým pěchem při teplotě asfaltové směsi 155 °C má míru zhutnění 100 %, lze pomocí poměru průměrné objemové hmotnosti jednotlivých skupin ku průměrné objemové hmotnosti 2x75 údery při 155 °C získat procentuální míru zhutnění zbylých skupin uvedených v *Tabulkách 7 a 8*.

Počet úderů Marshallovým pěchem	Průměrná objemová hmotnost [Mg/m ³]	Míra zhutnění
75	2,571	100,00 %
60	2,539	98,78 %
50	2,528	98,35 %
40	2,510	97,63 %

Tabulka 7 – Míra zhutnění skupin s různým počtem úderů Marshallovým pěchem

Teplota směsi při hutnění [°C]	Průměrná objemová hmotnost [Mg/m ³]	Míra zhutnění
155	2,571	100,00 %
145	2,539	98,79 %
135	2,516	97,88 %
125	2,488	96,77 %
115	2,507	97,51 %

Tabulka 8 – Míra zhutnění skupin s různou teplotou směsi při hutnění

Podle normy ČSN 73 6121 je předepsaná míra zhutnění zkoušené asfaltové vrstvy ACL 16 S minimálně 96,00 % a průměrná minimální míra zhutnění minimálně 98,00 %. Průměrné hodnoty objemové hmotnosti byly tedy v požadovaném rozmezí u skupiny hutněné 2x75, 2x60 a 2x50 údery a u skupiny hutněné při teplotě 155 °C a 145 °C. Při porovnání výsledků míry zhutnění jednotlivých zkoušených těles normě nevyhověly pouze 2 tělesa. Norma tedy dává značnou volnost pro akceptovatelnou míru zhutnění. Při následujících zkouškách je na tento fakt brán důraz a pozoruje se, jak velké rozmezí dalších výsledků vzniká na základě této volnosti.

4.4 Tuhost

4.4.1 Postup zkoušky

Dále se na zkušebních tělesech zkoušel modul tuhosti. V normě ČSN EN 12697-26 [12] je popisováno více způsobů, jak lze tuto vlastnost měřit. Pro tuto bakalářskou práci byla použita nedestruktivní zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY).

Nejdříve se zkoušená tělesa musela minimálně 4 hodiny temperovat na teplotu, při které zkouška probíhala. Jednalo se o teploty 0°, 15°, 27° a 40° C. Součástí přípravy měření bylo nastavení měřicího softwaru, který požadoval vyplnit rozměry tělesa, teplotu při zkoušce, Poissonův součinitel, který závisel na teplotě při zkoušce, zatěžovací pulz a požadovanou hodnotu příčné deformace. Poté se těleso vložilo do rámečku v měřicí komoře, kde se nastavila teplota s přesností na ±0,1 °C, pevně se upevnilo upínacími šrouby, které tlačily na

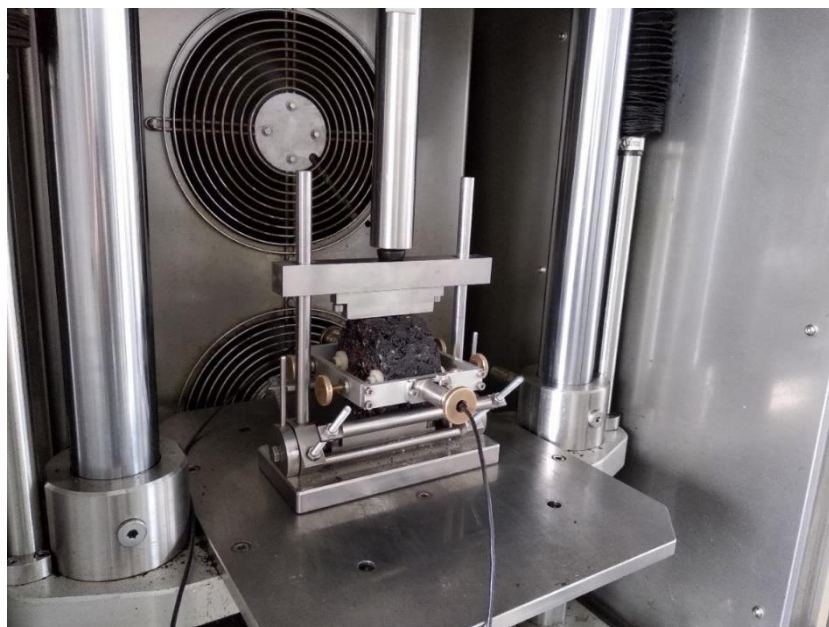


kruhové podstavy tělesa. Dále se nastavilo rozpětí snímačů, které měřily přednastavenou příčnou deformaci. Nejprve stroj provedl 10 zkušebních pulzů, po kterých se muselo upřesnit rozpětí snímačů a poté 5 měřených pulzů. Z takto změřených hodnot software vypočetl Modul tuhosti [MPa] pomocí vzorce uvedeného níže.

$$E = \frac{F * (v + 0,27)}{z * h}$$

Kde je

- E naměřený modul tuhosti [MPa]
- F maximální hodnota použitého svislého zatížení [N]
- z amplituda horizontální deformace [mm]
- h průměrná tloušťka zkušebního tělesa [mm]
- v Poissonův součinitel [-]



Obrázek 17 – Připravená sestava na měření tuhosti tělesa

Naměřený Modul tuhosti [MPa] byl přepočten pomocí vzorce uvedeného níže na Seřízený modul tuhosti [MPa], který byl brán jako výstupní hodnota. Poté se zkušební těleso otočilo o 90° a zkouška se provedla znovu.

$$E' = E * [1 - 0,322 * (\log E - 1,82) * (0,60 - k)]$$

Kde jsou

- E' modul tuhosti vyjádřený v megapascálech upravený na součinitel plochy zatížení;
- k naměřený součinitel plochy zatížení;
- E naměřený modul tuhosti při součiniteli zatížení k , s uvedením teploty ve stupních Celsia



Toto měření bylo provedeno na 6 zkušebních vzorcích z každé skupiny s různým počtem hutnicích úderů a na všech tělesech ze skupiny různých teplot asfaltové směsi při hutnění. Při zkoušce došlo ke znehodnocení jednoho tělesa z důvodu nefunkčnosti jednoho ze snímačů. Tuhosti všech těles vyhověly normovanému rozmezí -20 % až +10 %.



Obrázek 18 - Znehodnocené těleso

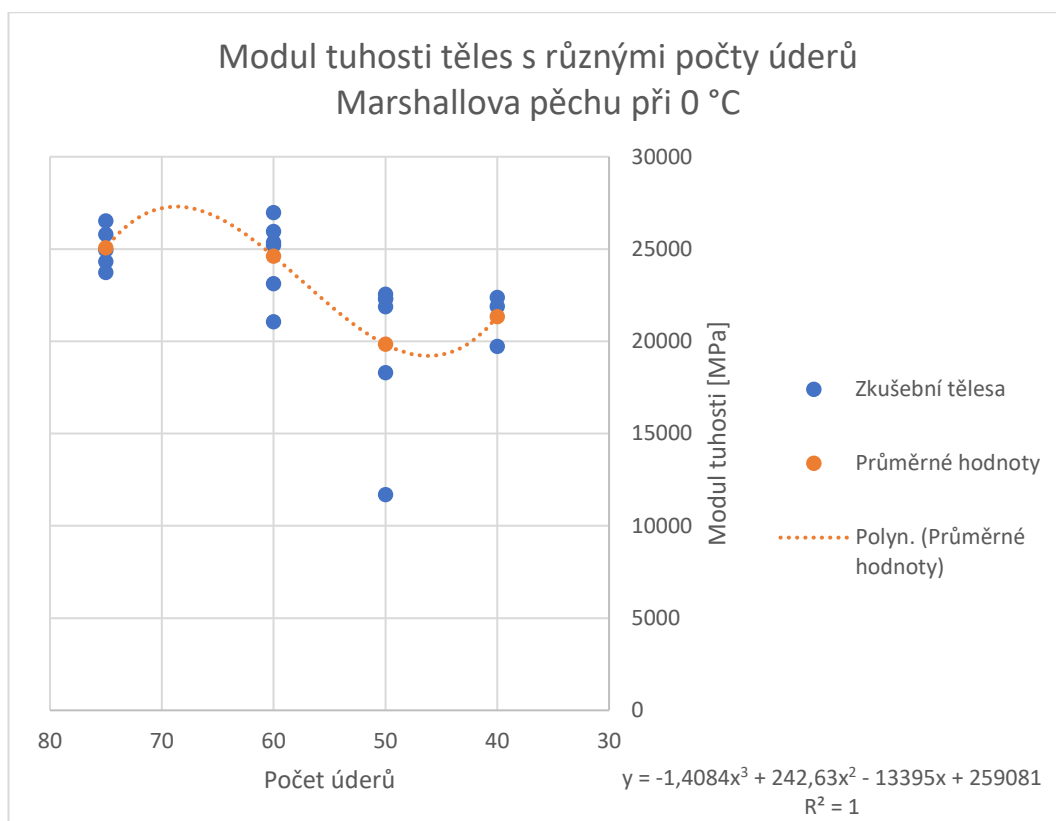
4.4.2 Výsledky zkoušky

Výsledné tuhosti jednotlivých těles a průměrných hodnot skupin se stejnými parametry byly vyneseny do grafů závislosti modulu tuhosti na počtu úderů, resp. na teplotě směsi při hutnění a proloženy spojnicemi trendu. Ve všech případech nejlépe popisovaly tuto závislost rovnice kubické, které jsou vždy i s hodnotou spolehlivosti uvedeny u jednotlivých grafů.

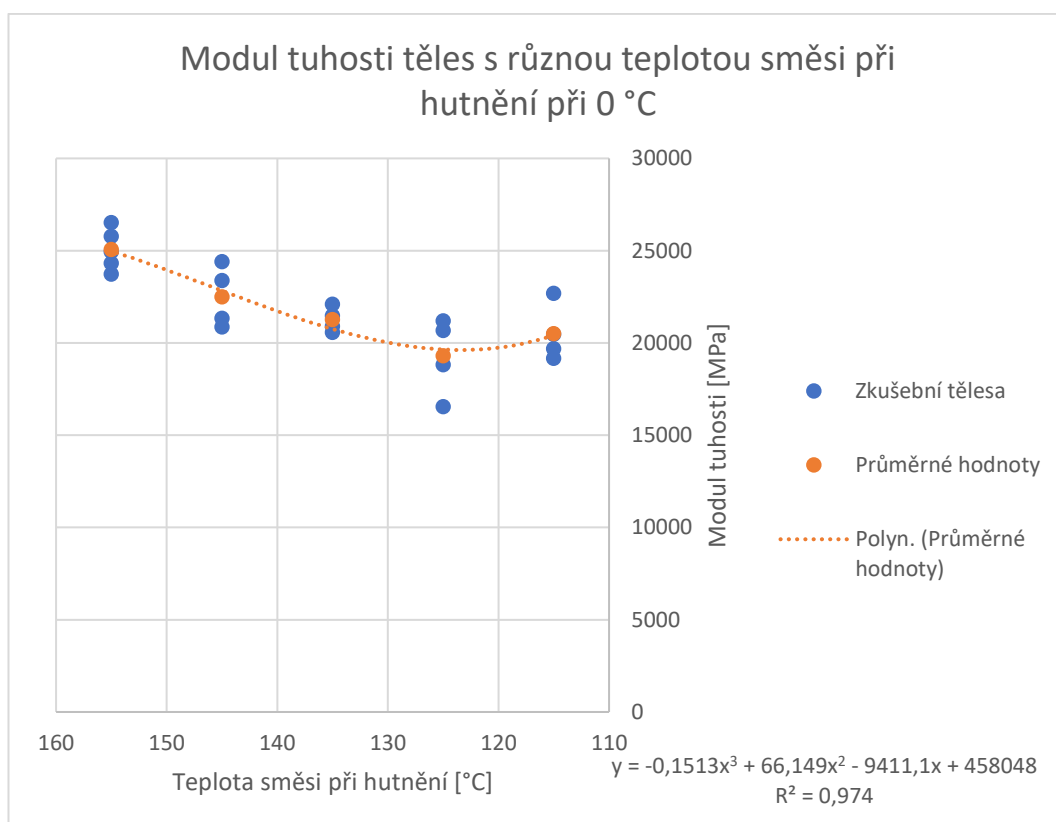
Obecně se dá říci, že u pozorovaných těles při snižování hutnicí energie pokles není znatelný, naopak některá tělesa hutněná menší hutnicí energií mají tuhost stejnou, nebo i vyšší než tělesa hutněná energií větší. Tento jev je nejlépe vidět při porovnání tuhostí skupiny hutněné 2x40 úderů a tělesa hutněného 2x75 úderů, kde má těleso hutněné menší energií větší tuhost o více než 1000 MPa. Největší rozptyl hodnot lze pozorovat u skupin hutněných 2x60 a 2x50 úderů Marshallova pěchu. I když je rozmezí u jednotlivých skupin značné, tak dle grafů je vidět, že by větší množství zkušebních těles trend závislosti ovlivnilo jen málo.

U grafů závislosti modulu tuhosti na teplotě směsi při hutnění lze pozorovat rychlejší pokles zejména mezi ochlazováním z normované teploty 155 °C na 145 °C a nejpomalejší pokles mezi teplotou 135 °C a 125 °C, při zkušebních teplotách 27 °C a 40 °C je dokonce vidět mezi těmito dvěma skupinami narůst. Minimální hodnoty tuhosti při zkušební teplotě 0 °C dosahují tělesa hutněná ze směsi o teplotě 125 °C, zatímco při ostatních zkušebních teplotách lze při snižování teploty hutnicí směsi pozorovat stálý pokles tuhosti. Nejvyšších tuhostí vždy dosahují tělesa hutněná ze směsi o teplotě 155 °C.

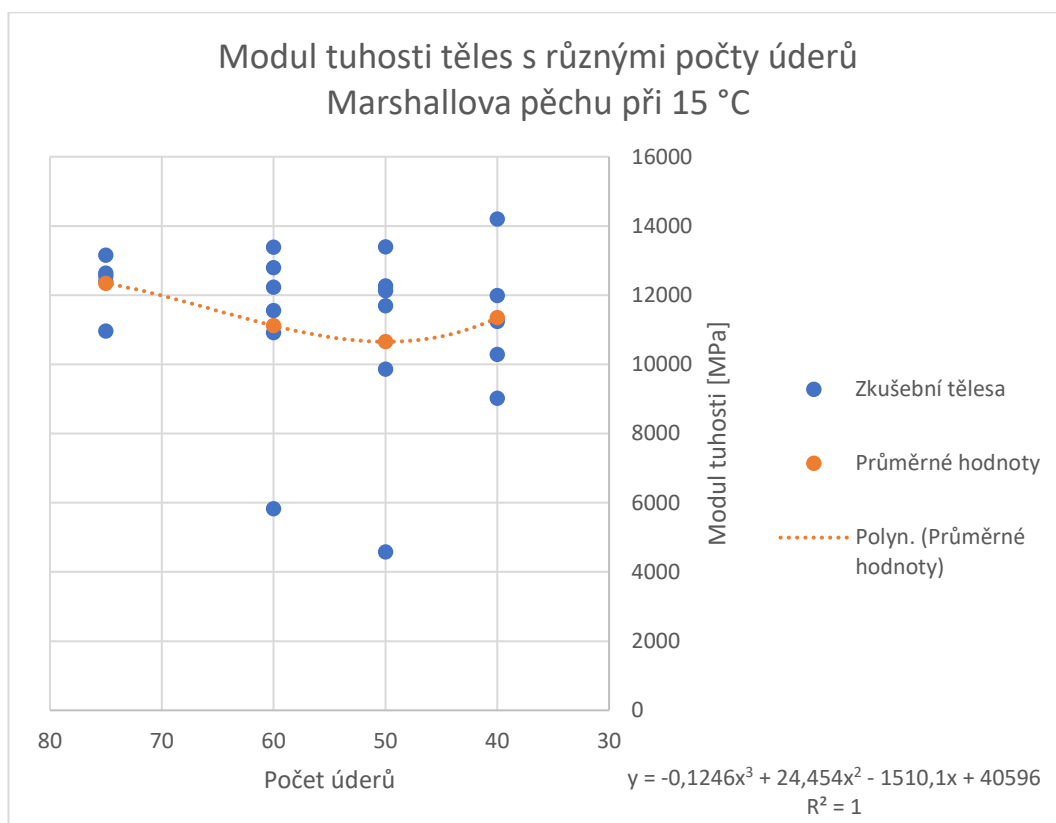
U grafů závislosti modulu tuhosti na počtu úderů jsou rozdíly při snižování hutnicí energie mnohem menší a spojnice trendů při jednotlivých zkušebních teplotách mnohem odlišnější. Lze pozorovat, že při zkušebních teplotách 0 °C a 15 °C minimální tuhosti dosahují tělesa hutněná 2x50 úderů, ale při vyšších zkušebních teplotách tuhost se snižováním hutnicí energie stále klesá.



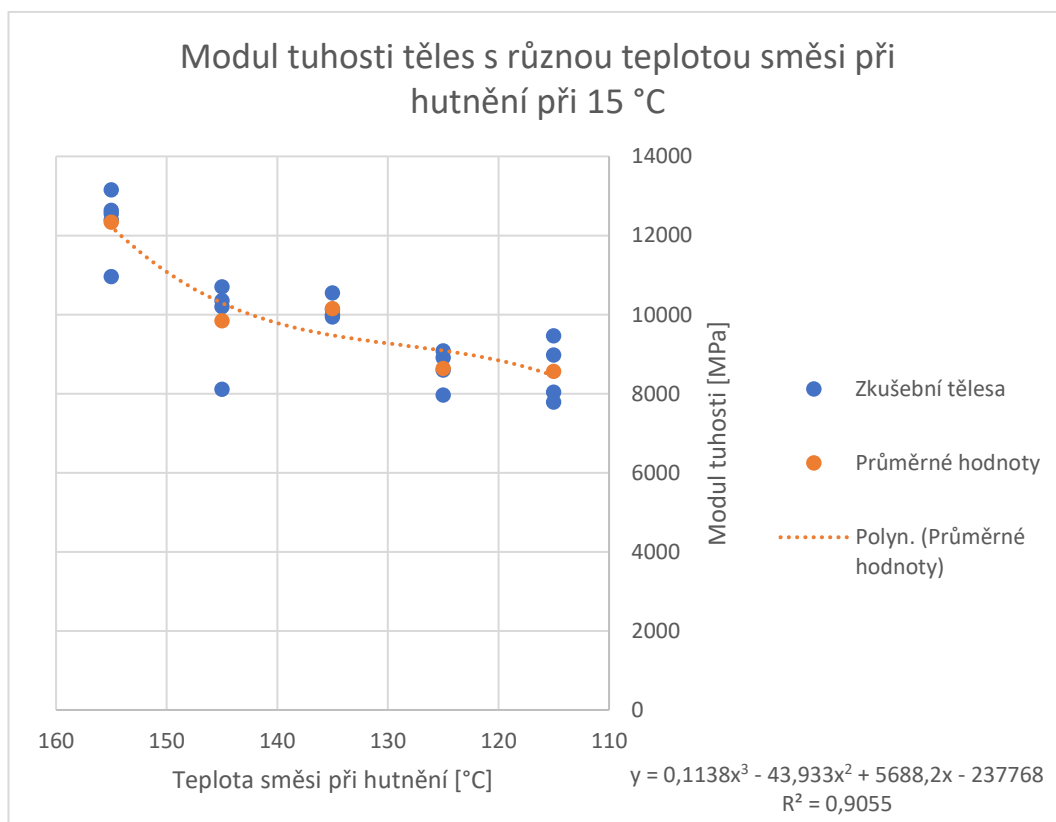
Obrázek 19 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 0 °C



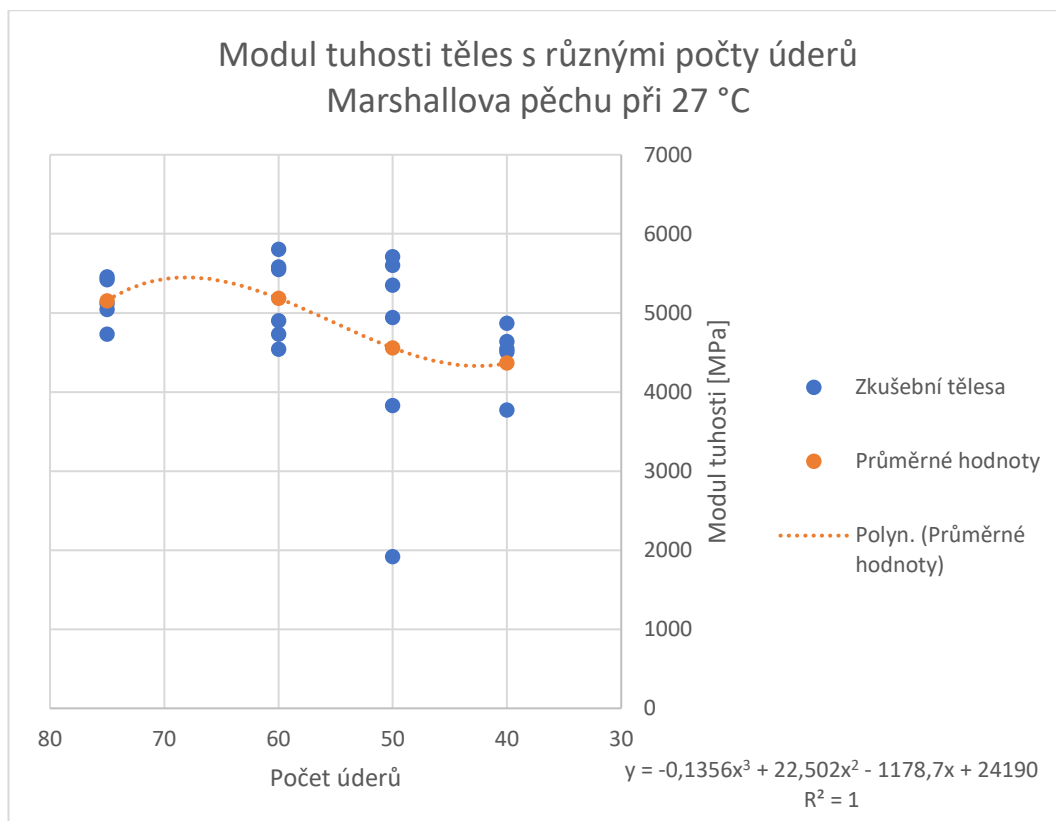
Obrázek 20 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 0 °C



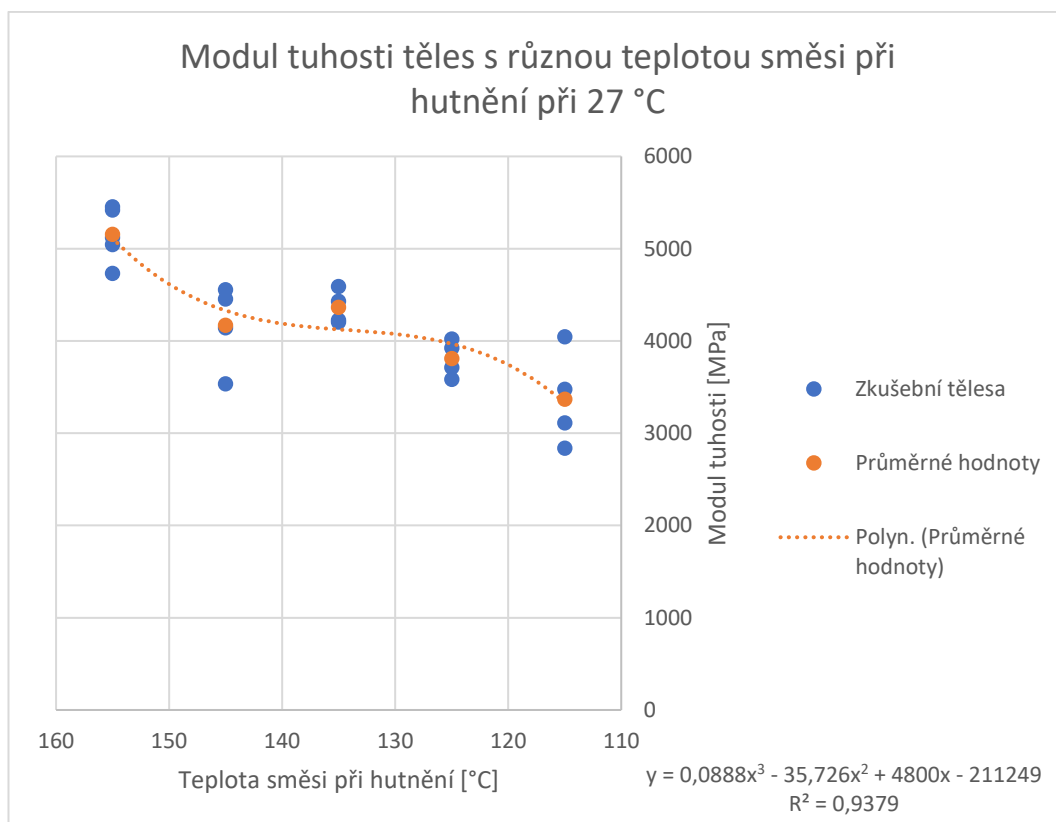
Obrázek 21 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 15 °C



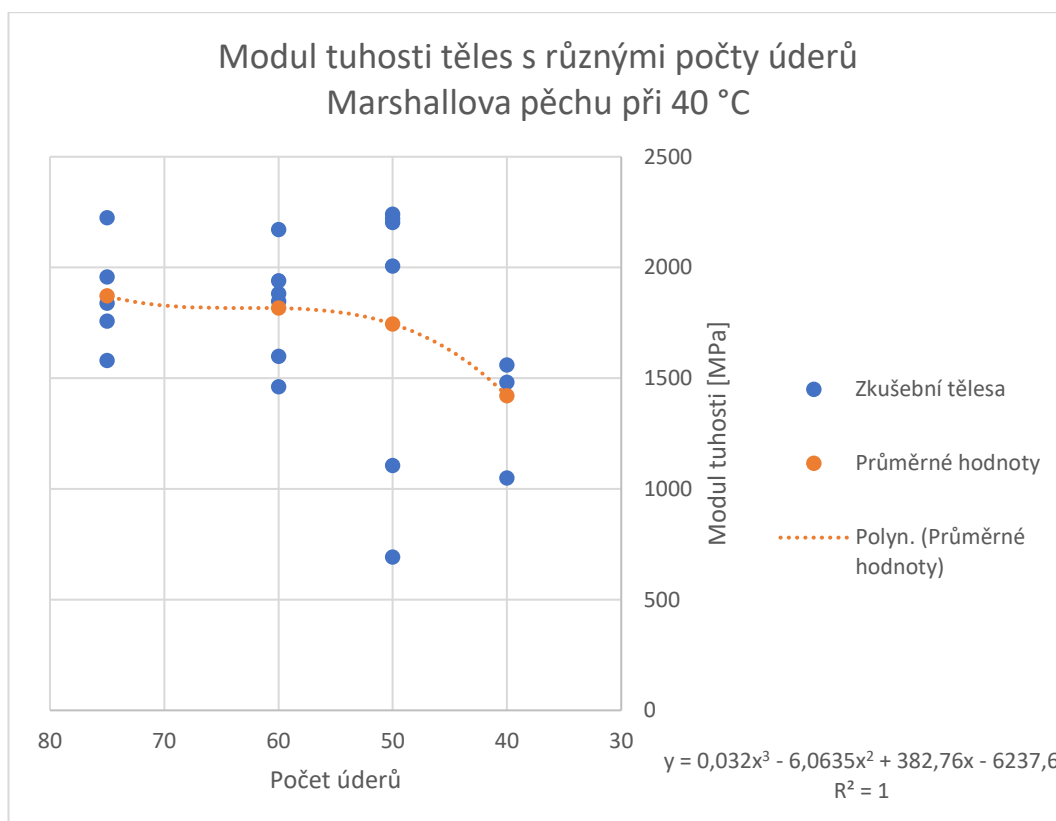
Obrázek 22 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 15 °C



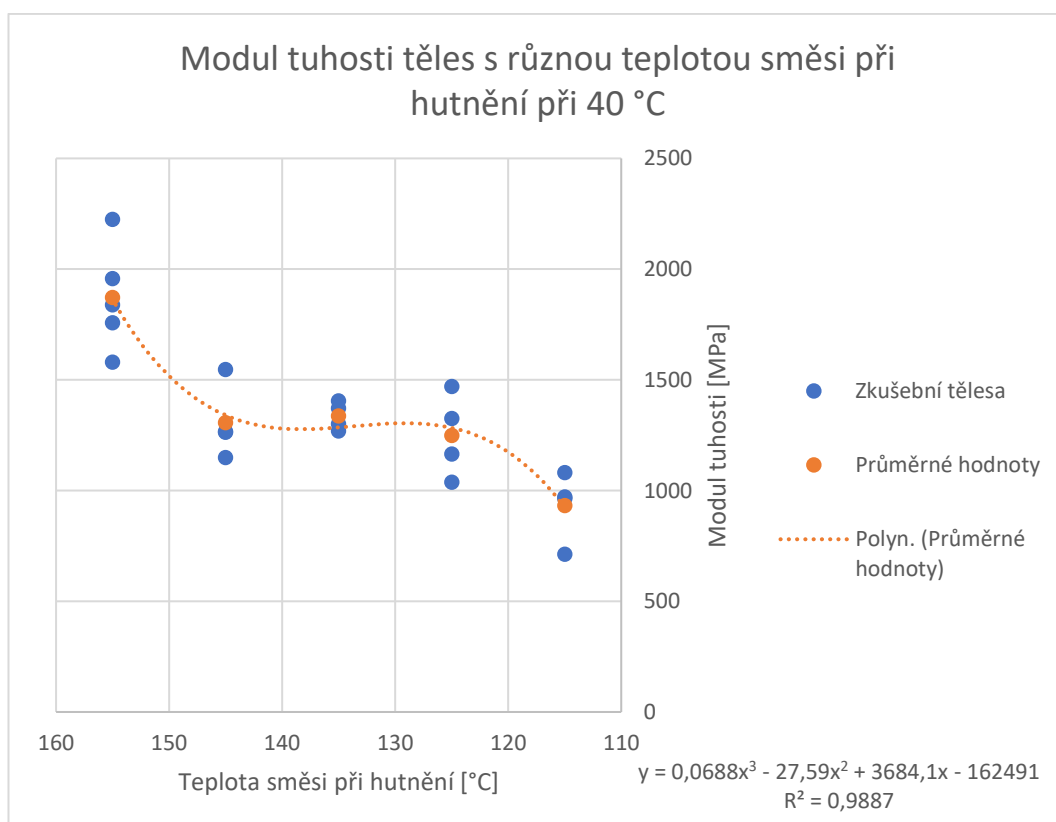
Obrázek 23 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 27 °C



Obrázek 24 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 27 °C



Obrázek 25 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 40 °C



Obrázek 26 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 40 °C



Pro větší přehlednost a shrnutí výsledků jsou níže přiložené *Tabulky 9 a 10* s průměrnými hodnotami Modulu tuhosti jednotlivých skupin těles a poměr průměrných modulů tuhosti jednotlivých skupin se stejnou hutností energií ku průměrnému modulu tuhosti skupiny hutněné dle normy viz. kapitola 4.2.

Počet úderů	Průměrná naměřená hodnota Modulu tuhosti při teplotě [MPa]							
	0 °C		15 °C		27 °C		40 °C	
75	25056	100,00%	12339	100,00%	5154	100,00%	1872	100,00%
60	24612	98,23%	11117	90,10%	5184	100,59%	1816	97,04%
50	19836	79,17%	10654	86,35%	4559	88,45%	1744	93,21%
40	21334	85,15%	11346	91,95%	4366	84,71%	1421	75,91%

Tabulka 9 – Průměrné hodnoty modulu tuhosti při různém počtu úderů pěchem

Teplota směsi [°C]	Průměrná naměřená hodnota Modulu tuhosti při teplotě [MPa]							
	0 °C		15 °C		27 °C		40 °C	
155	25056	100,00%	12339	100,00%	5154	100,00%	1872	100,00%
145	22493	89,77%	9843	79,77%	4170	80,92%	1306	69,78%
135	21260	84,85%	10151	82,26%	4364	84,67%	1337	71,41%
125	19308	77,06%	8638	70,00%	3810	73,93%	1249	66,74%
115	20502	81,82%	8564	69,40%	3367	65,34%	932	49,80%

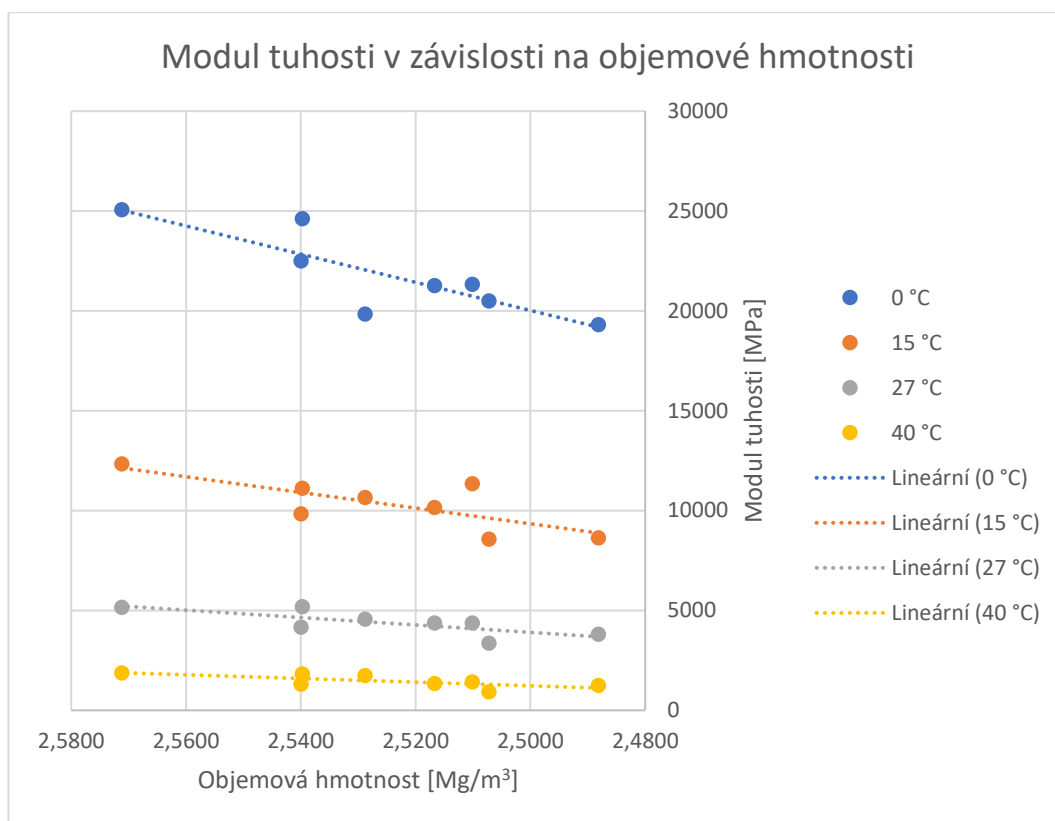
Tabulka 10 - Průměrné hodnoty modulu tuhosti při různých teplotách směsi při hutnění

Obecně mají větší modul tuhosti tělesa ve skupině s různým počtem úderů Marshallovým pěchem. Celkový největší pokles nastává při zkušební teplotě 40 °C u těles hutněných ze směsi o různé teplotě, a to až o 50 % a nejmenší při zkušební teplotě 15 °C u těles hutněných různým počtem úderů, konkrétně o 8 %. Největší skok mezi jednotlivými skupinami nastává při zkušební teplotě 40 °C při snížení teploty směsi při hutnění ze 155 °C na 145 °C, A to více než o 30 %. Naopak nejmenší skok je při zkušební teplotě 27 °C při snížení počtu úderů z 2x75 na 2x60 a to o 0,6 %.

Z *Tabulky 9 a 10* se dá říci, že pokles tuhosti asfaltové vrstvy zapříčiněný ochlazením hutněné vrstvy jen o 10 °C lze přirovnat k poklesu počtu ran Marshallovým pěchem téměř o 2x35 ran. Z tohoto zjištění plyne, že je při hutnění na stavbě z hlediska zajištění co nejvyšší tuhosti potřeba dbát mnohem více na správnou teplotu hutněné vrstvy než na samotnou hutnicí energii.

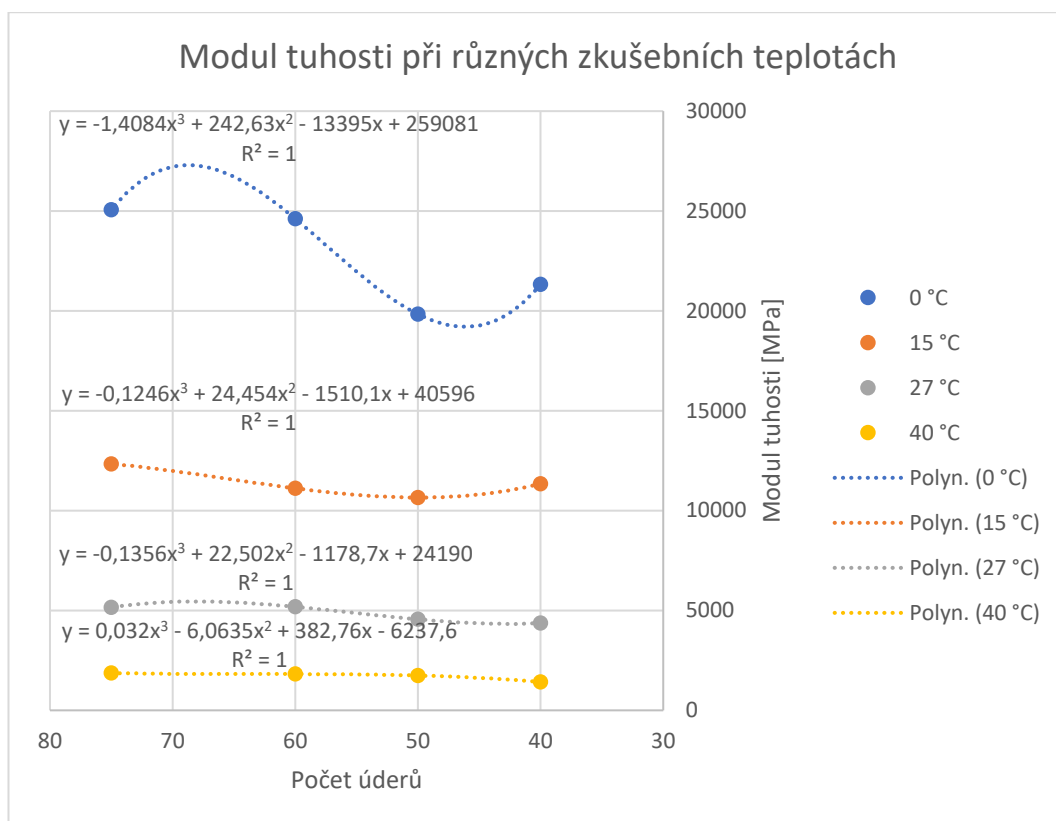
Z *Tabulek 9 a 10* se dá zároveň dále pozorovat předpokládaný nárůst tuhosti při zvyšování hutnicí energie. Stejně tak je celkem jasně u průměrných naměřených modulů tuhosti patrný pokles modulu tuhosti při zvyšování teploty při zkoušce.

Na *Obrázku 27 - Modul tuhosti v závislosti na objemové hmotnosti* byl vztažen modul tuhosti k objemové hmotnosti. Na něm lze pozorovat, že největší sklon má pokles při zkušební teplotě 0 °C, kde je rozdíl mezi krajními body více než 5700 MPa, naopak nejmenší rozdíl je jasně vidět mezi krajními body při zkušební teplotě 40 °C, konkrétně 940 MPa. Jsou zde použity lineární spojnice trendu s tím, že logaritmická, kvadratická a mocninná tvořily minimální rozdíl.

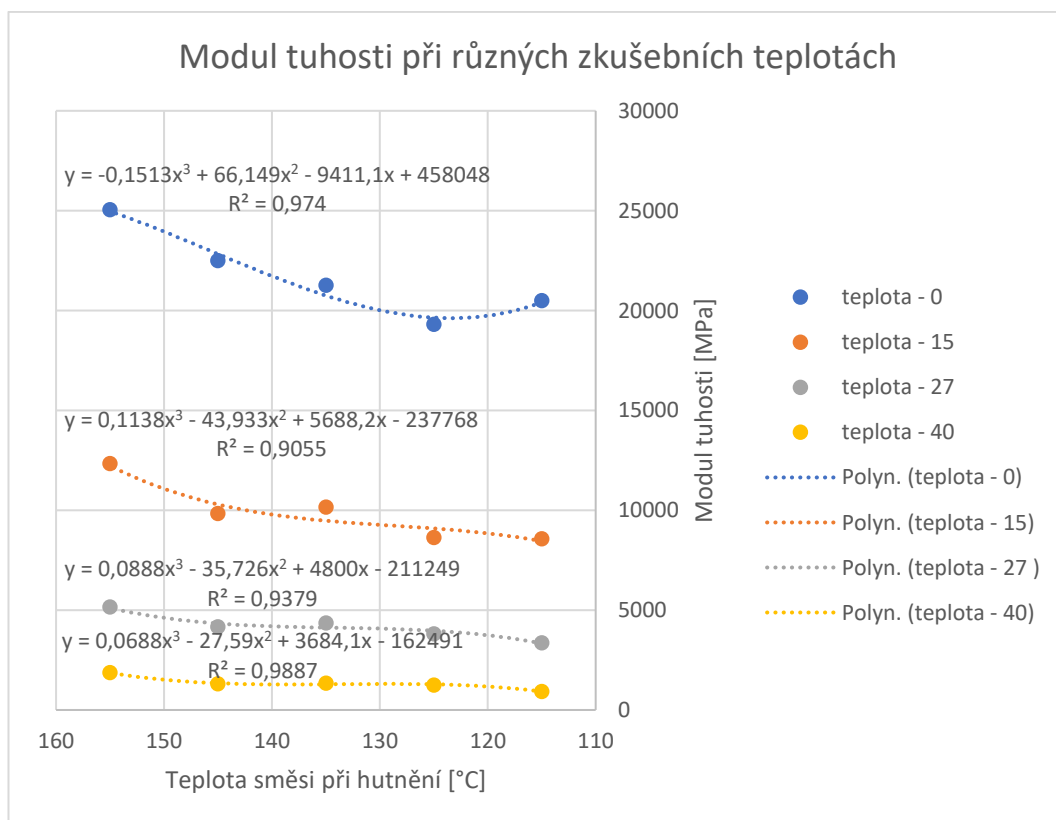


Obrázek 27 – Modul tuhosti v závislosti na objemové hmotnosti

Dále lze pozorovat výsledky modulu tuhosti v závislosti na míře zhutnění z kapitoly 4.3.2, ve kterých normě vyhovovalo zhutnění skupiny 75, 60, 50, 155 a 145. Pokles modulu tuhosti mezi skupinou s 2x75 údery a 2x50 údery je největší při zkušební teplotě 0 °C, a to 20 %. Pokles mezi skupinou 155 °C a 145 °C je naopak největší při zkušební teplotě 40 °C, a to o 30 %. Lze tedy říci, že míra zhutnění dovolená normou dovoluje pokles modulu tuhosti až o 30 %, a že tuhost asfaltové vrstvy klesá nejvíce při krajních teplotách.



Obrázek 28 – Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách – skupina těles s různým počtem úderů pěstem



Obrázek 29 - Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách – skupina těles s různou teplotou směsi při hutnění



4.5 Marshallova zkouška

Dále se na tělesech podle normy ČSN EN 12697-34 [13] měřila stabilita a přetvoření. Z každé skupiny byly Marshallovou zkouškou odzkoušeny 4 tělesa. Nejdříve se tělesa vložila do vodní lázně s teplotou $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ tak, aby byla minimálně 25 mm nade dnem a zároveň minimálně 25 mm pod hladinou vody a tak, aby se tělesa navzájem nedotýkala. V takto připravené vodní lázni se tělesa temperovala 20 až 40 minut. Poté se těleso bokem upevnilo do tlačných čelistí tak, aby bylo co nejvíce v jejich středu a začalo se zatěžovat. Zatěžování hydraulickým lisem probíhalo s rychlostí posunu (50 ± 2) mm za minutu, dokud se nedosáhlo maximální zatěžovací síly. Software zaznamenal jak průběh zatěžování, tak průběh deformací a vykresloval graf závislosti maximálního zatížení [kN] a deformace [mm]. Maximální možná odchylka získané stability od průměrné hodnoty je dle normy 15 % a maximální odchylka deformací od průměru 20 %. Z takto získaných hodnot byly vyhotoveny grafy závislosti stability a deformací na počtu úderů, resp. na teplotě výroby směsi při hutnění a následně vypočtena míra stability jako poměr výsledné stability ku přetvoření.



Obrázek 30 – Průběh Marshallovy zkoušky

V následujících *Tabulkách 11 a 12* jsou uvedeny průměrné hodnoty stability, přetvoření a míry stability jednotlivých skupin těles poté, co z výsledků byly vyškrtnuty hodnoty mimo normované rozmezí.



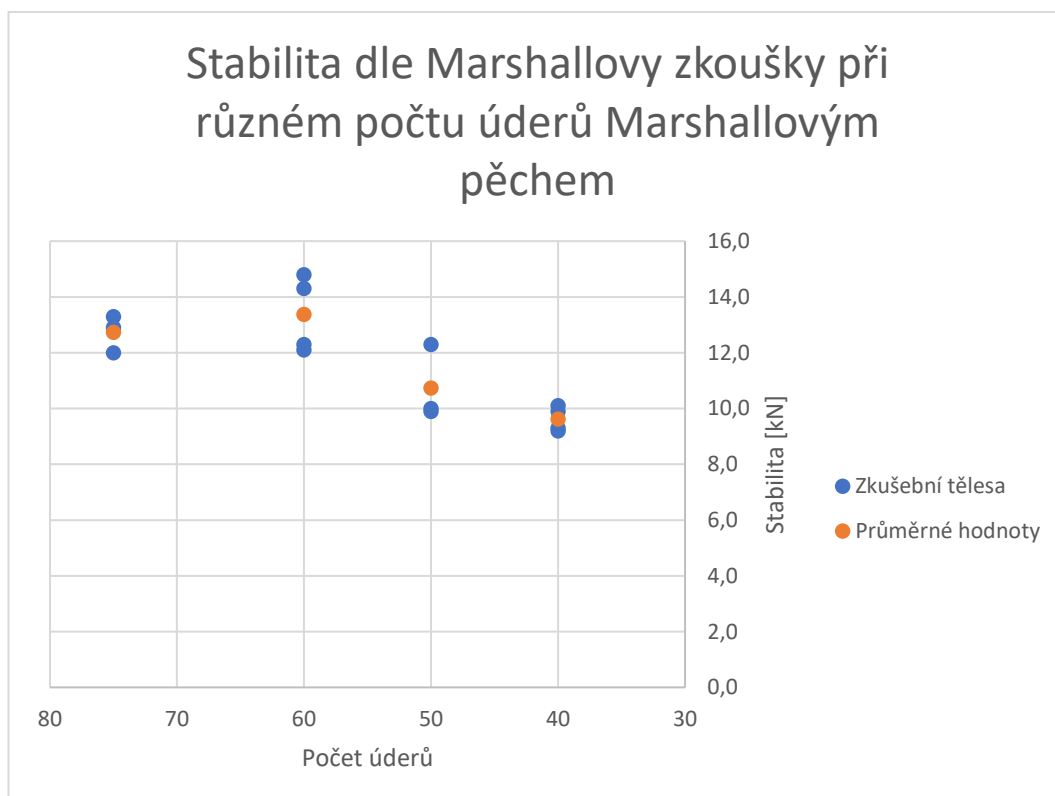
Počet úderů Marshallovým pěchem	Průměrná stabilita [kN]	Průměrné přetvoření [mm]	Průměrná míra stability [0,1kN/mm]
75	12,7	2,6	49,61
60	13,4	2,5	54,04
50	10,7	3,4	31,26
40	9,6	3,0	31,82

Tabulka 11 – Výsledky Marshallovy zkoušky – tělesa s různým počtem úderů

Teplota směsi při hutnění [°C]	Průměrná stabilita [kN]	Průměrné přetvoření [mm]	Průměrná míra stability [0,1kN/mm]
155	12,7	2,6	49,61
145	9,7	2,9	33,84
135	10,6	4,3	24,53
125	9,1	3,3	27,96
115	8,6	3,3	26,46

Tabulka 12 - Výsledky Marshallovy zkoušky – tělesa s různou teplotou směsi při hutnění

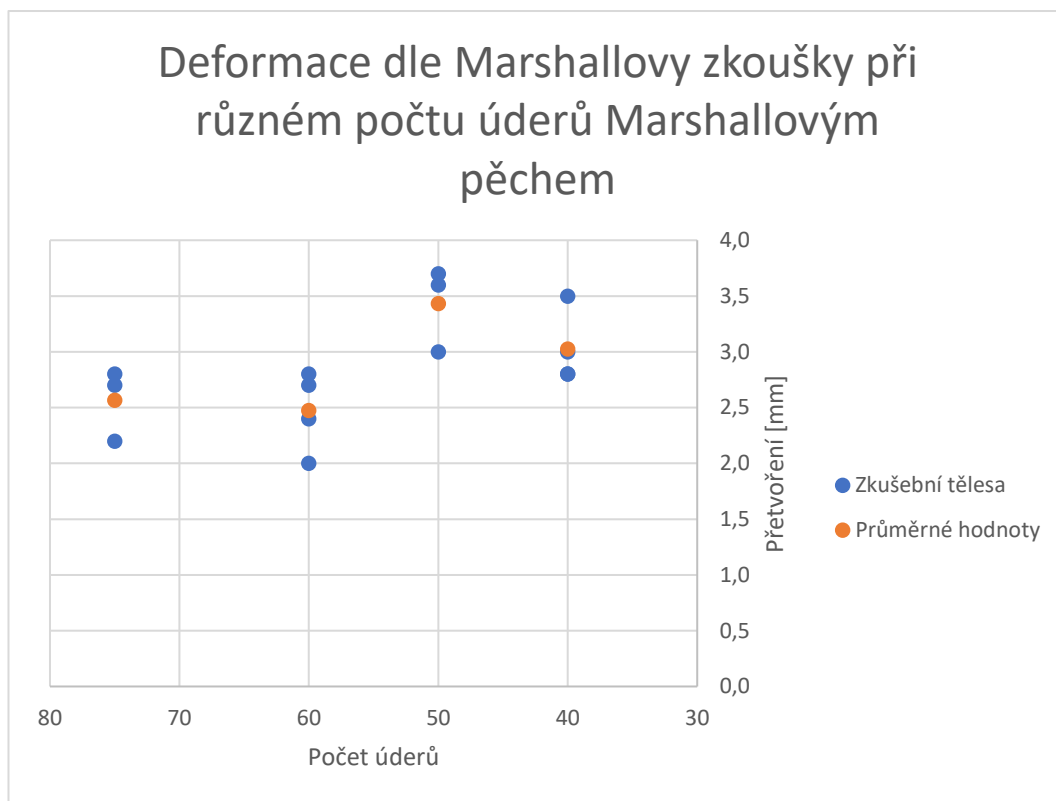
Z výsledků míry stability těles hutněných různým počtem úderů Marshallova pěchu na Obrázku 33 není jasně vidět žádný trend poklesu, jsou zde výrazné skoky mezi jednotlivými skupinami. Ve výsledcích lze sledovat nepředpokládaný nárůst stability při snížení počtu úderů Marshallova pěchu z 2x75 na 2x60. Z grafu je ale patrné, že za to může značný rozptyl výsledků jednotlivých těles z této skupiny. Lze proto předpokládat, že při zkoušení většího počtu takto hutněných těles by se průměrná hodnota oproti normovaným zkoušeným vzorkům snížila.



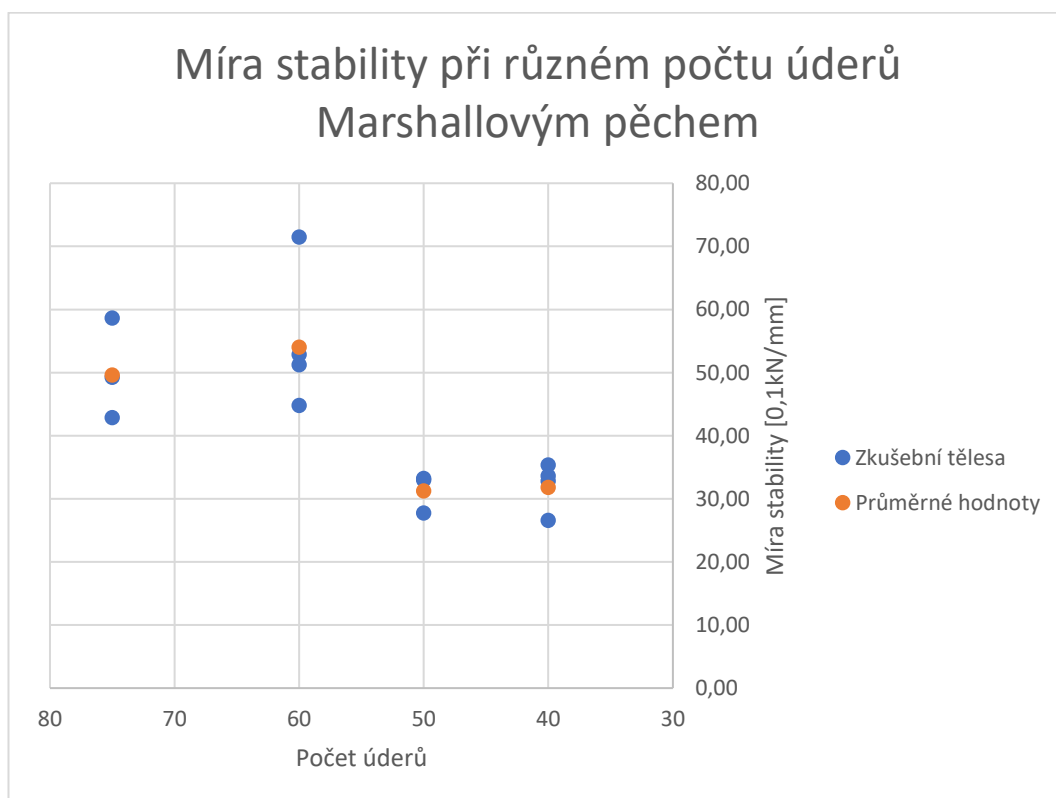
Obrázek 31 – Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem



Na *Obrázku 31* lze také pozorovat, že tělesa skupiny 75 a 40 mají znatelně menší rozptyl stability než skupiny zbylé. Rozptyl přetvoření se u všech vzorků hutněných různým počtem úderů Marshallova pěchu pohybuje v rozmezí $\pm 0,4\text{mm}$ od průměrné hodnoty.



Obrázek 32 – Deformace dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem



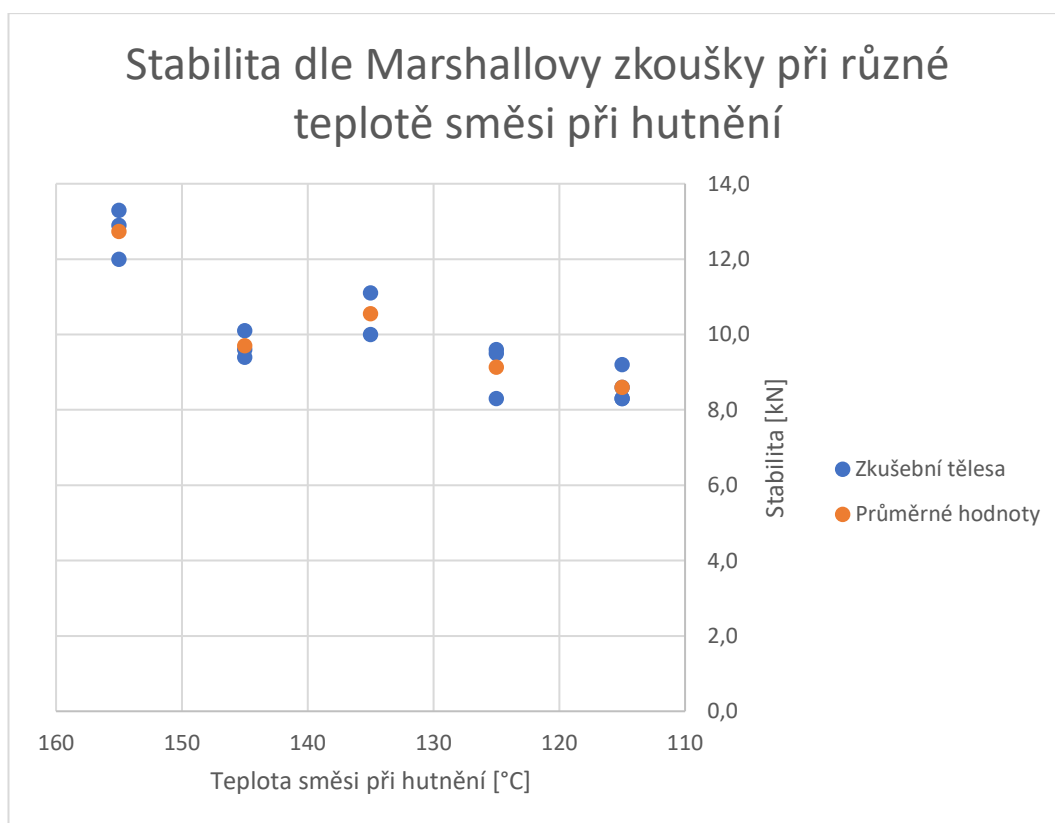
Obrázek 33 – Míra stability těles při různém počtu úderů Marshallovým pěchem



U výsledků těles, které byly hutněny ze směsí o různých teplotách, jsou dle *Obrázku 35* výrazně mimo trend přetvoření skupiny hutněné při 135 °C. Její průměrné přetvoření se od těles hutněných podle normy liší o více než 65 %. Na *Obrázku 34* lze také sledovat, že pokles stability mezi skupinou 155 a 145 je značný, zatímco při dalších snížení teploty směsi při hutnění je pokles mnohem menší. Některé vzorky hutněné ze směsi s teplotou 115 °C mají dokonce srovnatelnou stabilitu se vzorky hutněné ze směsi s teplotou o 30 °C vyšší. Přitom skupina těles hutněných při 145 °C je podle kapitoly 4.3.2 zhutněná na více než 98 % a z hlediska míry zhutnění vyhovuje, zatímco tělesa ze skupin hutněných ze směsi o nižší teplotě nikoliv.

Grafem míry stability těles hutněných při různé teplotě směsi v *Obrázku 36* lze proložit polynommickou spojnici trendu s rovnicí, která je uvedena níže. Nepředpokládaným zjištěním je, že nejnižší hodnota průměrné míry stability je u těles hutněných při teplotě 135 °C.

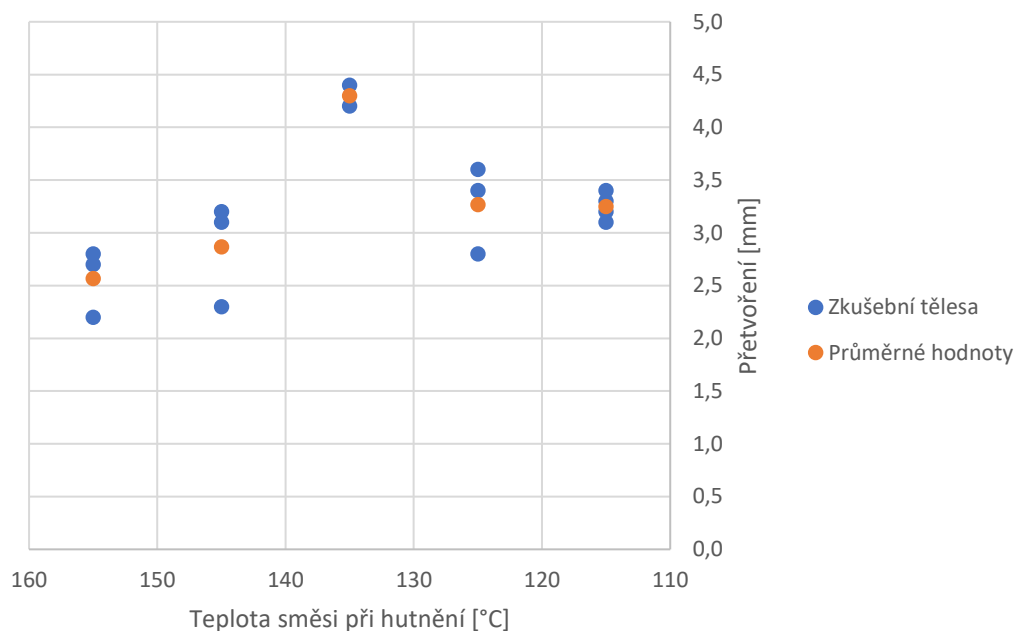
$$y = 0,0295x^2 - 7,4389x + 493,49$$



Obrázek 34 – Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění

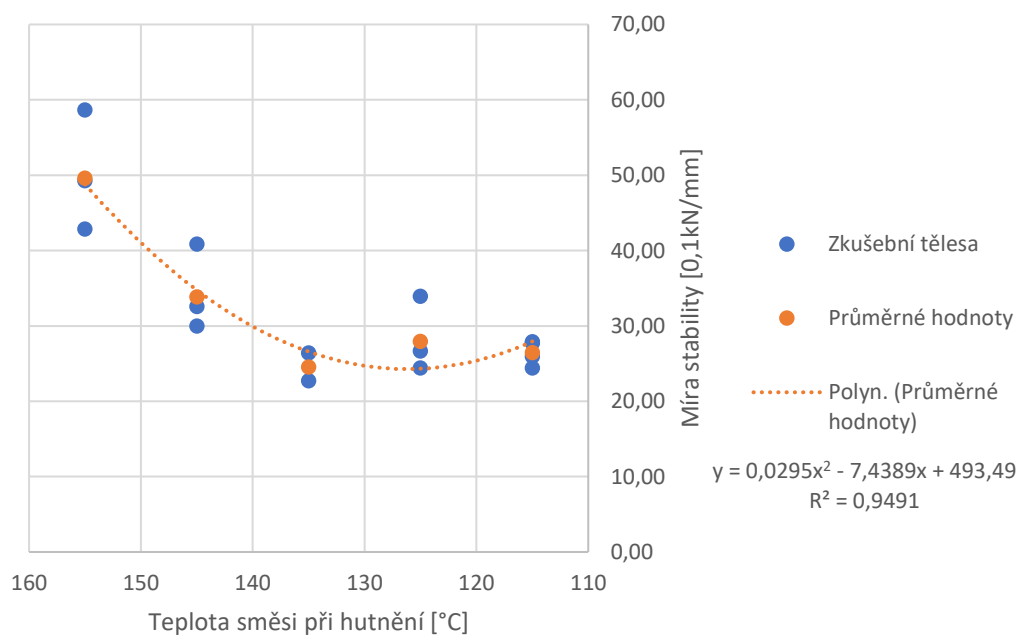


Deformace dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění



Obrázek 35 - Přetvoření dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění

Míra stability při různé teplotě směsi při hutnění



Obrázek 36 – Míra stability při různé teplotě směsi při hutnění

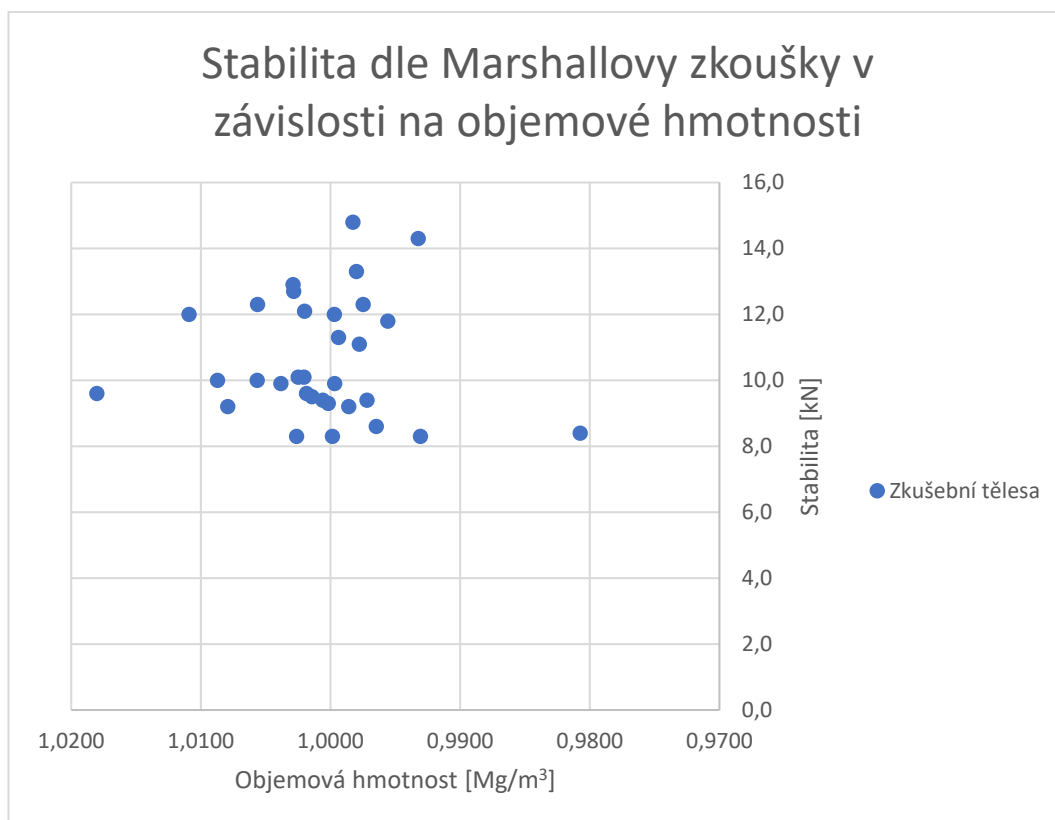


Pokud se porovnají výsledky skupin těles hutněných směsí o různé teplotě, jejichž hodnoty míry zhutnění dle objemové zkoušky v kapitole 4.3.2 vyhověly normě, tak lze konstatovat, že při poklesu míry zhutnění ze 100 % na 98 % dojde ke snížení stability více než o pětinu a také k růstu přetvoření až o třetinu.

Když by se u této zkoušky vyvozoval vztah mezi snižováním počtů úderů Marshallovým pěchem a snižováním teploty, při které byla tělesa hutněna, došlo by se k závěru, že snížení o 10 °C lze přirovnat k poklesu počtu úderů pěchem o 2x35 úderů.

Obecně lze u výsledků Marshallovy zkoušky pozorovat, že jsou výsledky stability mnohem více citlivé na změnu teploty hutněné směsi než na hutnící energii. Z toho pro praktické využití plyne, že je při hutnění asfaltových vrstev potřeba z hlediska stability dbát více na teplotu hutněné vrstvy.

Zajímavým výstupem z této zkoušky je, že z *Obrázku 37 – vztah mezi stabilitou a objemovou hmotností* je vidět, že stabilita není na objemové hmotnosti nijak závislá, zatímco při pohledu na *Obrázky 31 a 34*, kde se stabilita zkušebních vzorků vztahuje k hutnící energii, je závislost zřetelně vidět.



Obrázek 37 - Vztah mezi stabilitou a objemovou hmotností



5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo poukázat na důležitost technologických zásad pokládky pomocí srovnání chování směsi při dodržení těchto zásad a při jejich nedodržení. Konkrétně se porovnávaly výsledky objemové hmotnosti, tuhosti v příčném tahu a Marshallovy zkoušky na válcových tělesech ze směsi ACL 16 S hutněné 4 různými hutními energiemi, nebo hutněné za 5 různých teplot směsi.

Z výsledků objemové hmotnosti byly vyhotoveny grafy závislosti snižování hutní energie na objemové hmotnosti. Z těchto výsledků vyplynulo, že požadavkům normy ČSN 73 6121 na předepsanou míru zhutnění vyhověla i válcová tělesa hutněná sníženým počtem úderů o 2x25 oproti normě, zatímco při snižování teploty vyhověla tělesa pouze se sníženou teplotou směsi o 10 °C.

Obecně ze všech prováděných zkoušek bylo zjištěno, že je zkoušená asfaltová směs mnohem citlivější na změnu teploty při hutnění než na hutní energii samotnou. U porovnávání výsledků tuhosti v příčném tahu při poklesu teploty směsi pouze o 10 °C došlo ke snížení tuhosti o 30 %, zatímco při snížení počtu ran o 2x25 došlo ke snížení pouze o 20 %. Při Marshallově zkoušce dokonce došlo při snížení počtu úderů o 2x10 úderů k navýšení stability o 5 %. Při snižování teploty směsi naopak došlo při snížení ze 155 °C na 145 °C k poklesu stability směsi více než o 20 %.

Pro ověření výše uvedených závěrů by bylo nutné zkoušky opakovat s mnohem větším počtem zkušebních těles a menším krokem snižování hutní energie. Zároveň je nutno uvést, že byly zkoumány pouze některé důležité vlastnosti asfaltové směsi a pro vyvození jakýchkoli závěrů by bylo nutné zkoumat jich mnohem více.

Cílem této práce bylo zdůraznit důležitost dodržování technických zásad. Podle získaných výsledků je ale vidět, že i při jejich dodržování může mít asfaltová směs značně rozdílné vlastnosti. Tyto odlišnosti zkoumaných vlastností jsou způsobeny normou dovoleným rozmezím míry zhutnění. Z tohoto důvodu by stálo za uvážení, zda by nebylo pro zvýšení kvality asfaltových vrstev vhodné nároky na míru zhutnění zpřísnit.



6 Seznam použité literatury

- [1] ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [2] HANZÍK, Václav, Pavel KLAPKA, Petr MONDSCHNEIN, František LUXEMBURK, Martin OTTA a Daniel SOVA. Pokládka hutněných asfaltových směsí: revidované a rozšířené vydání s počítačovým programem. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2015. ISBN 978-80-903925-6-4.
- [3] Manfred MADLER. TECHNOLOGICKÁ NEKÁZEŇ – PŘÍČINA VZNIKU PORUCH ASFALTOVÝCH VOZOVEK. Gestrata 2003, sešit 100, str. 27, 22 obr.
- [4] Hýzl, Petr. Praktické aplikace v pozemních komunikacích modul 6 asfaltové směsi. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno 2006.
- [5] naše výrobky - Hamm - Roads ČR s.r.o. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: <https://www.wirtgen-group.com/cr/cs/products/hamm/>
- [6] 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: <https://www.bomag.com/www-en/machinery/>
- [7] HANZÍK, Václav, MONDSCHNEIN, Petr. Školení STEPS 7 - Pokládka hutněných asfaltových směsí [prezentace]. Dostupné z : <http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReNIF68PD1cweqhxRjKvFzt1OvjAD1P9WJqHo6IbkUK5mzyeTK5RyDVRPSKBJwpxi6wQVIWFfs90cAWArcIHNB4pOZ9%2FjCxZQa8iD8o0GM1tr6NaDHVDez3%2FCeHprSu0jEz2S8YfJ1mMI86DPqKfvpfipByHQR2viQH8uw40y0WNoVwq7dvq5Fonush6xaK8ujLaBHa6l9Ql6xt8iac89fm68p4cg6F4l55iJToF81SV5jYcvd2bsHxYi2w9boRjwRK8w820fMzwqvSUO60MThZRVGqxsDBiegwfwqL9QNo6kqKbxLJebqM5tw0ZL9tDdJ5FsDq5fL3a8U8%2BogNcmoqqgcVa55VuKVKE%2BnxKHGblkQ4rfhHHC8IPmu3hTD72U5WbBiatnUqU%2B1d2aBF10JNwEHoSHXKgD6hFRWWC0XC3VzWMARtG4JjKQUTg6Ob5XQv6POMlD4Yyra33WU5zE9d8%2FIETs0XKz1mF2m%2BaEbQlUNL%2BDKi1VfSc%2Fi5AdSv8apQ%3D%3D&name=SiteContent.aspx>
- [8] ČSN EN 12697-30 OPRAVA 1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [9] ČSN EN 12697-30 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [10] ČSN EN 12697-6 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [11] ČSN EN 12697-29 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut.
- [12] ČSN EN 12697-26 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [13] ČSN EN 12697 – 34+A1 (736160) Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 34: Marshallova zkouška. Praha: Český normalizační institut, 2007.



7 Seznam obrázků a tabulek

7.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Nomogram pro stanovení počtu dopravních prostředků stejné kapacity [2]	10
Obrázek 2 – Komplexní přehled faktorů ovlivňujících výsledek hutnění [2]	12
Obrázek 3 – Průběh ochlazování asfaltové vrstvy [7]	13
Obrázek 4 – Graf pro stanovení doby ochlazení	15
Obrázek 5 – Vliv rychlosti pojezdu finišeru a frekvence vibrace na míru předhutnění [7]	17
Obrázek 6 – Statický válec HAMM HD 14 TT [5]	18
Obrázek 7 – Pneumatický válec BOMAG BW 27 RH [6]	19
Obrázek 8 – Vibrační válec BOMAG BW 206 AD-5 AM [6]	19
Obrázek 9 – Kombinovaný válec BOMAG BW 161 AC – 50 [6]	20
Obrázek 10 - Marshallův pěch infraTest	23
Obrázek 11 – Vyrobená zkušební tělesa	24
Obrázek 12 - Graf závislosti objemové hmotnosti na počtu úderů Marshallova pěchu – porovnání jednotlivých metod výpočtu	26
Obrázek 13 - Graf závislosti objemové hmotnosti těles na teplotě směsi při hutnění – porovnání jednotlivých metod výpočtu	26
Obrázek 14 – Graf závislosti objemové hmotnosti a počtu úderů Marshallova pěchu	27
Obrázek 15 – Graf závislosti objemové hmotnosti těles na teplotě směsi při hutnění	28
Obrázek 16 - Graf závislosti objemové hmotnosti těles na teplotě směsi při hutnění bez skupiny 125	28
Obrázek 17 – Připravená sestava na měření tuhosti tělesa	30
Obrázek 18 - Znehodnocené těleso	31
Obrázek 19 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 0 °C	32
Obrázek 20 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 0 °C	32
Obrázek 21 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 15 °C	33
Obrázek 22 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 15 °C	33
Obrázek 23 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 27 °C	34
Obrázek 24 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 27 °C	34
Obrázek 25 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 40 °C	35
Obrázek 26 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 40 °C	35
Obrázek 27 – Modul tuhosti v závislosti na objemové hmotnosti	37
Obrázek 28 – Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách – skupina těles s různým počtem úderů pěchem	38
Obrázek 29 - Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách – skupina těles s různou teplotou směsi při hutnění	38
Obrázek 30 – Průběh Marshallovy zkoušky	39
Obrázek 31 – Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem	40
Obrázek 32 – Deformace dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem	41
Obrázek 33 – Míra stability těles při různém počtu úderů Marshallovým pěchem	41
Obrázek 34 – Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění	42
Obrázek 35 - Přetvoření dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění	43
Obrázek 36 – Míra stability při různé teplotě směsi při hutnění	43
Obrázek 37 - Vztah mezi stabilitou a objemovou hmotností	44



7.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Minimální teploty vzduchu při pokládce [1].....	9
Tabulka 2 – Teploty asfaltové směsi při jejím rozprostírání [1]	11
Tabulka 3 – Doporučené teploty pro hutnění asfaltových směsí [1].....	11
Tabulka 4 – Míra předhutnění směsi a koeficient nadvýšení v závislosti na technologii pokládky [4].....	16
Tabulka 5 – Použitelnost válců pro jednotlivé fáze.....	21
Tabulka 6 – Počet vyrobených zkušebních těles.....	24
Tabulka 7 – Míra zhutnění skupin s různým počtem úderů Marshallovým pěchem.....	29
Tabulka 8 – Míra zhutnění skupin s různou teplotou směsi při hutnění	29
Tabulka 9 – Průměrné hodnoty modulu tuhosti při různém počtu úderů pěchem	36
Tabulka 10 - Průměrné hodnoty modulu tuhosti při různých teplotách směsi při hutnění ..	36
Tabulka 11 – Výsledky Marshallovy zkoušky – tělesa s různým počtem úderů.....	40
Tabulka 12 - Výsledky Marshallovy zkoušky – tělesa s různou teplotou směsi při hutnění ..	40



8 Přílohy

8.1 Seznam příloh

Příloha 1 – Objemová hmotnost těles s různým počtem úderů	50
Příloha 2 – Objemová hmotnost těles s různou teplotou směsi při hutnění.....	51
Příloha 3 – Porovnání metod zjišťování objemové hmotnosti těles s různým počtem úderů	52
Příloha 4 - Porovnání metod zjišťování objemové hmotnosti těles s různou teplotou směsi při hutnění.....	52
Příloha 5 – Objemová hmotnost těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při hutnění	53
Příloha 6 - Objemová hmotnost těles s různou teplotou směsi při hutnění.....	53
Příloha 7 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 0 °C	54
Příloha 8 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 0 °C	55
Příloha 9 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 15 °C	56
Příloha 10 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 15 °C	57
Příloha 11 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 27 °C	58
Příloha 12 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 27 °C	59
Příloha 13 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 40 °C	60
Příloha 14 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 40 °C	61
Příloha 15 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 0 °C	62
Příloha 16 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 0 °C	62
Příloha 17 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 15 °C	63
Příloha 18 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 15 °C	63
Příloha 19 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 27 °C	64
Příloha 20 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 27 °C	64
Příloha 21 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 40 °C	65
Příloha 22 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 40 °C	65
Příloha 23 - Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách	66
Příloha 24 - Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách	66
Příloha 25 - Modul tuhosti v závislosti na objemové hmotnosti	67
Příloha 26 - Výsledky Marshallovy zkoušky	68
Příloha 27 - Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem	69
Příloha 28 - Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění.....	69
Příloha 29 - Deformace dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem	70
Příloha 30 - Deformace dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění.....	70
Příloha 31 - Míra stability při různém počtu úderů Marshallovým pěchem.....	71
Příloha 32 - Míra stability při různé teplotě směsi při hutnění.....	71
Příloha 33 - Stabilita dle Marshallovy zkoušky v závislosti na objemové hmotnosti.....	72

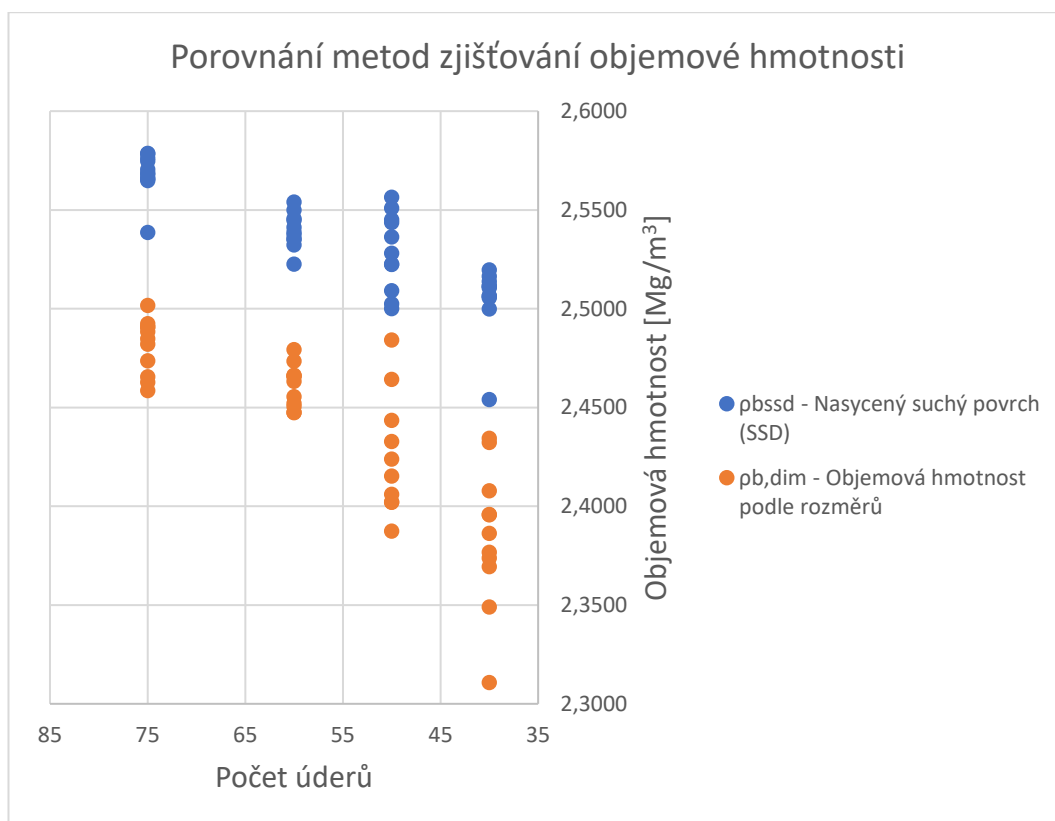


Objemová hmotnost těles s různými počty úderů																	
Těleso	Počet úderů	h - Výška tělesa [mm]				øh Průměrná výška	d - Průměr tělesa [mm]				m - Hmotnost tělesa [g]			t - Teplota vody při zkoušce [°C]	ρ _w - Hustota vody při zkoušce [Mg/m ³]	ρ - Objemová hmotnost [Mg/m ³] ρ _{nas} - Nasycený suchý povrch (SSD)	Zhutnitelnost [%]
		h ₁ 1. Výška	h ₂ 2. Výška	h ₃ 3. Výška	h ₄ 4. Výška		d ₁ 1. Průměr	d ₂ 2. Průměr	ød Průměrný průměr	m ₁ - Suchá	m ₂ - Mokrá	m ₃ - Osušená					
75-A	75	54,34	55,50	54,97	54,10	54,73	102,04	102,23	102,14	1105,50	676,90	1107,00	19,7	0,998336934	2,5661	2,4656	99,51%
75-B	75	54,10	53,78	53,96	54,12	53,99	102,43	102,47	102,45	1108,60	680,80	1110,00	19,7	0,998336934	2,5786	2,4909	100,00%
75-C	75	53,77	54,73	53,95	54,39	54,21	101,88	101,94	101,91	1106,20	679,10	1107,40	19,7	0,998336934	2,5785	2,5017	99,99%
75-D	75	54,21	54,70	54,52	55,28	54,68	101,95	101,84	101,90	1107,90	679,30	1109,60	19,7	0,998336934	2,5704	2,4848	99,68%
75-E	75	56,04	56,61	55,61	55,75	56,00	101,96	101,94	101,95	1137,60	695,70	1138,50	19,7	0,998336934	2,5648	2,4884	99,46%
75-F	75	54,37	54,18	54,48	53,94	54,24	101,92	102,05	101,99	1099,80	675,10	1101,30	19,7	0,998336934	2,5762	2,4821	99,90%
75-G	75	54,74	55,13	54,63	55,20	54,93	102,27	102,25	102,26	1124,30	689,00	1126,10	19,7	0,998336934	2,5679	2,4924	99,58%
75-H	75	53,80	54,06	54,26	54,89	54,25	102,35	102,55	102,45	1113,90	682,70	1114,60	19,7	0,998336934	2,5748	2,4906	99,85%
75-I	75	54,60	54,07	54,37	54,42	54,37	102,01	101,90	101,96	1097,90	672,50	1099,70	19,7	0,998336934	2,5687	2,4736	99,50%
75-K	75	55,65	56,60	56,65	56,60	56,38	102,60	102,45	102,53	1144,20	700,90	1145,60	19,7	0,998336934	2,5687	2,4585	99,61%
60-A	60	57,09	56,43	56,08	56,52	56,53	101,81	101,93	101,87	1139,60	692,00	1140,70	20,2	0,998234595	2,5353	2,4734	98,32%
60-B	60	56,73	56,13	57,02	57,31	56,80	102,25	102,26	102,26	1143,70	692,80	1145,40	20,2	0,998234595	2,5225	2,4520	97,82%
60-C	60	56,31	56,49	57,70	57,51	57,00	101,98	101,95	101,97	1147,70	698,70	1148,90	20,2	0,998234595	2,5448	2,4657	98,69%
60-D	60	56,62	55,81	56,87	57,68	56,75	101,85	101,78	101,82	1139,30	695,60	1140,90	20,2	0,998234595	2,5540	2,4660	99,04%
60-E	60	56,79	56,14	55,67	55,89	56,12	101,80	101,81	101,81	1125,30	683,50	1126,20	20,2	0,998234595	2,5374	2,4632	98,40%
60-F	60	55,68	56,03	57,07	56,89	56,42	101,79	102,16	101,98	1127,70	685,90	1129,30	20,2	0,998234595	2,5388	2,4474	98,46%
60-G	60	55,07	54,77	55,14	56,08	55,27	103,39	103,25	103,32	1137,70	690,40	1138,90	20,2	0,998234595	2,5322	2,4554	98,20%
60-H	60	56,41	55,81	55,75	54,67	55,66	103,23	103,13	103,18	1140,40	694,30	1141,50	20,2	0,998234595	2,5456	2,4504	98,72%
60-I	60	55,73	55,01	55,30	56,03	55,52	101,85	101,80	101,83	1120,90	683,50	1122,30	20,2	0,998234595	2,5500	2,4794	98,89%
60-J	60	56,87	56,22	55,77	55,90	56,19	101,99	101,88	101,91	1130,30	687,30	1131,30	20,2	0,998234595	2,5412	2,4663	98,55%
60-K	60	57,29	56,26	56,31	57,21	56,77	101,96	101,78	101,87	1132,40	688,50	1134,40	20,2	0,998234595	2,5351	2,4475	98,31%
50-A	50	59,47	59,53	58,94	58,60	59,14	101,70	101,79	59,40	1138,60	692,50	1142,10	20,2	0,998234595	2,5280	0,0783	98,04%
50-B	50	56,49	56,48	56,85	57,38	56,80	101,80	101,89	101,85	1140,20	695,20	1141,40	20,2	0,998234595	2,5508	2,4641	98,92%
50-C	50	54,27	54,61	55,94	55,02	54,96	102,04	102,19	102,12	1118,10	682,80	1119,40	20,2	0,998234595	2,5564	2,4841	99,14%
50-D	50	55,24	55,66	55,57	56,39	55,72	102,30	102,25	102,28	1118,40	677,30	1119,90	20,2	0,998234595	2,5224	2,4434	97,82%
50-E	50	54,14	55,00	55,23	55,36	54,93	101,85	101,83	101,84	1088,60	699,10	1089,90	20,2	0,998234595	2,5225	2,4328	97,82%
50-F	50	58,20	56,23	55,62	56,68	56,68	101,40	101,33	101,37	1104,80	667,80	1108,50	20,2	0,998234595	2,5025	2,4153	97,05%
50-G	50	58,43	58,90	59,29	59,49	59,03	101,82	101,94	101,88	1155,80	704,20	1157,80	20,2	0,998234595	2,5436	2,4019	98,64%
50-H	50	56,39	56,92	56,28	55,63	56,31	101,84	101,95	101,90	1104,70	666,80	1107,90	20,2	0,998234595	2,5000	2,4060	96,95%
50-I	50	56,83	57,08	57,31	57,11	57,07	103,30	103,21	103,26	1140,90	690,20	1144,10	20,2	0,998234595	2,5091	2,3874	97,30%
50-J	50	55,92	56,40	56,15	55,62	56,02	101,75	101,78	101,77	1104,50	671,40	1106,10	20,2	0,998234595	2,5063	2,4239	98,36%
50-K	50	58,59	58,25	57,98	57,83	58,16	101,92	101,88	101,90	1139,40	694,60	1141,50	20,2	0,998234595	2,5451	2,4021	98,70%
40-A	40	57,30	56,62	56,90	57,21	57,01	101,93	101,46	101,70	1109,30	676,10	1116,20	19,7	0,998336934	2,5164	2,3957	97,58%
40-B	40	56,42	57,10	57,84	56,91	57,07	101,77	101,84	101,81	1100,70	668,40	1106,80	19,7	0,998336934	2,5065	2,3695	97,20%
40-C	40	55,75	56,12	54,61	55,26	55,44	101,58	101,70	101,64	1083,00	658,50	1087,60	19,7	0,998336934	2,5197	2,4078	97,71%
40-E	40	55,86	55,62	57,09	56,30	56,22	101,69	101,55	101,62	1108,00	672,30	1113,30	19,7	0,998336934	2,5106	2,4323	97,36%
40-F	40	56,16	55,49	55,70	56,53	55,97	101,60	101,77	101,69	1106,50	668,50	1109,40	19,7	0,998336934	2,5055	2,4344	97,16%
40-G	40	56,62	57,44	57,21	56,82	57,02	101,83	101,78	101,81	1090,30	663,40	1097,70	19,7	0,998336934	2,5063	2,3489	97,19%
40-H	40	54,74	54,20	54,57	55,73	54,81	101,75	101,73	101,74	1063,30	647,30	1070,00	19,7	0,998336934	2,5113	2,3863	97,39%
40-I	40	55,68	55,63	55,60	55,72	55,66	101,89	102,15	102,02	1080,00	656,30	1087,60	19,7	0,998336934	2,4999	2,3738	96,95%
40-J	40	54,54	54,57	55,29	55,51	54,98	102,11	102,31	102,21	1080,70	655,60	1084,80	19,7	0,998336934	2,5118	2,3958	97,48%
40-K	40	54,19	55,02	55,85	55,05	55,03	103,04	103,11	103,08	1091,30	663,00	1096,80	19,7	0,998336934	2,5115	2,3767	97,40%
40-D	40	59,16	57,70	58,33	59,02	58,55	101,68	101,07	101,38	1092,10	663,80	1108,10	19,7	0,998336934	2,4339	2,3108	95,16%
75-F	75	56,40	55,74	54,70	55,04	55,47	101,87	101,88	101,88	1113,50	677,10	1115,00	19,7	0,998336934	2,5366	2,4627	98,45%

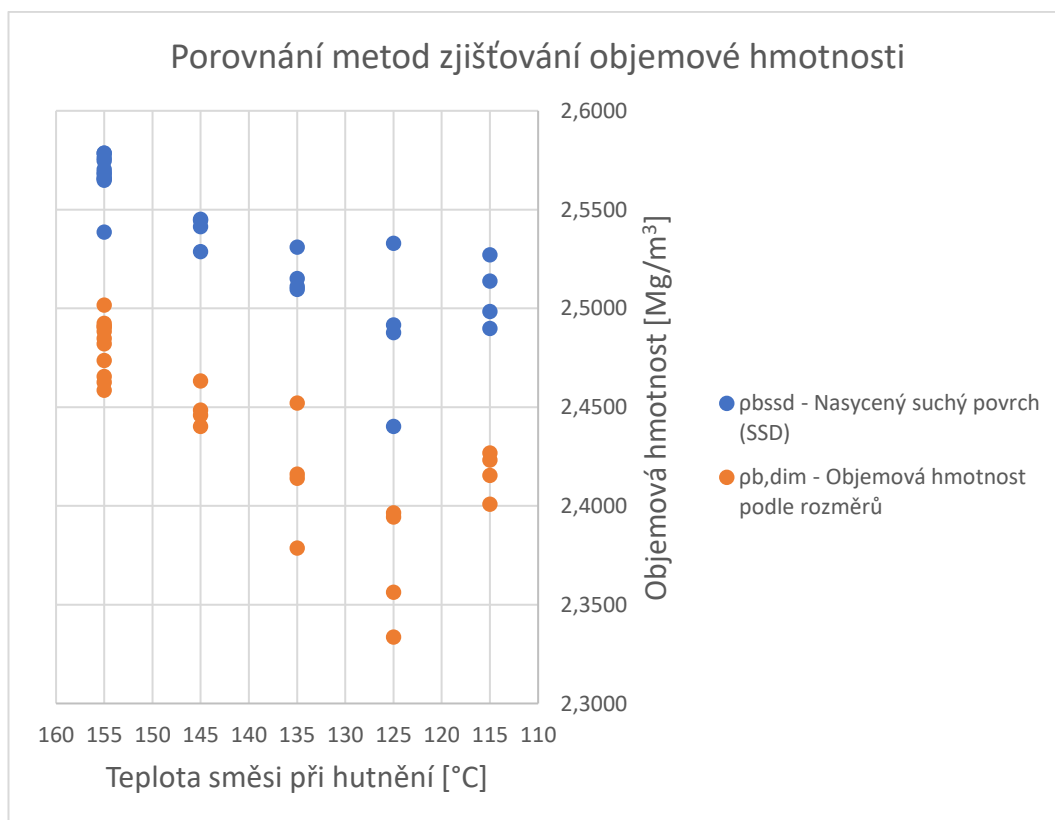
Příloha 1 – Objemová hmotnost těles s různým počtem úderů

Objemová hmotnost těles s různou teplotou směsi při hutnění																	
Těleso	Teplota [°C]	h - Výška tělesa [mm]				d - Průměr tělesa [mm]				m - Hmotnost tělesa [g]			t - Teplota vody při zkoušce [°C]	ρ _w - Hustota vody při zkoušce [Mg/m ³]	ρ - Objemová hmotnost [Mg/m ³] ρ _{hsoad} - Nasycený suchý povrch (SSD)	Zhutitelnost [%]	
		h ₁ 1. Výška	h ₂ 2. Výška	h ₃ 3. Výška	h ₄ 4. Výška	oh	d ₁ 1. Průměr	d ₂ 2. Průměr	od Průměrný průměr	m ₁ - Suchá m ₂ - Mokrá m ₃ - Osušená							
75-A	155	54,34	55,50	54,97	54,10	54,73	102,04	102,23	102,14	1105,50	676,90	1107,00	19,7	0,998336934	2,5661	2,4656	99,51%
75-B	155	54,10	53,78	53,96	54,12	53,99	102,43	102,47	102,45	1108,60	680,80	1110,00	19,7	0,998336934	2,5786	2,4909	100,00%
75-C	155	53,77	54,73	53,95	54,39	54,21	101,88	101,94	101,91	1106,20	679,10	1107,40	19,7	0,998336934	2,5785	2,5017	99,99%
75-D	155	54,21	54,70	54,52	55,28	54,68	101,95	101,84	101,90	1107,90	679,30	1109,60	19,7	0,998336934	2,5704	2,4848	99,68%
75-E	155	56,04	56,61	55,61	55,75	56,00	101,96	101,94	101,95	1137,60	695,70	1138,50	19,7	0,998336934	2,5648	2,4884	99,46%
75-G	155	54,37	54,18	54,48	53,94	54,24	101,92	102,05	101,99	1099,80	675,10	1101,30	19,7	0,998336934	2,5762	2,4821	99,90%
75-H	155	54,74	55,13	54,63	55,20	54,93	102,27	102,25	102,26	1124,30	689,00	1126,10	19,7	0,998336934	2,5679	2,4924	99,58%
75-I	155	53,80	54,06	54,26	54,89	54,25	102,35	102,55	102,45	1113,90	682,70	1114,60	19,7	0,998336934	2,5748	2,4906	99,85%
75-J	155	54,60	54,47	54,37	54,01	54,37	101,90	101,90	101,96	1097,90	672,50	1099,70	19,7	0,998336934	2,5657	2,4736	99,50%
75-K	155	55,65	56,60	56,65	56,60	56,38	102,45	102,45	102,53	1144,20	700,90	1145,60	19,7	0,998336934	2,5687	2,4585	99,61%
145-A	145	53,52	53,86	53,55	54,54	53,87	103,33	103,30	103,32	1112,40	678,80	1115,20	19,1	0,99845623	2,5451	2,4633	98,70%
145-B	145	56,70	56,31	56,48	57,18	56,67	101,90	102,37	102,14	1135,60	691,10	1139,50	19,1	0,99845623	2,5287	2,4460	98,06%
145-C	145	52,63	52,43	52,53	53,07	52,66	102,30	103,00	102,65	1067,00	651,70	1070,90	19,1	0,99845623	2,5414	2,4485	98,56%
145-D	145	57,23	57,54	57,53	56,68	57,20	102,02	102,12	102,07	1142,00	696,50	1144,60	19,1	0,99845623	2,5446	2,4402	98,68%
135-A	135	58,30	57,10	58,08	58,28	57,94	101,89	101,90	101,90	1158,50	702,00	1161,90	19,1	0,99845623	2,5151	2,4520	97,54%
135-B	135	54,97	54,65	54,08	53,70	54,35	102,57	102,51	102,54	1084,40	661,10	1088,90	19,1	0,99845623	2,5509	2,4161	98,15%
135-C	135	58,93	58,71	58,74	60,05	59,11	102,04	102,16	102,10	1168,20	708,90	1173,40	19,1	0,99845623	2,5111	2,4140	97,38%
135-D	135	56,65	56,88	56,23	56,55	56,58	102,18	101,89	102,04	1098,40	667,80	1105,60	19,1	0,99845623	2,5096	2,3786	97,32%
125-A	125	56,87	56,75	56,78	57,42	56,96	102,16	102,00	102,08	1098,30	667,40	1108,20	19,1	0,99845623	2,4878	2,3562	96,48%
125-B	125	57,32	57,28	57,48	58,11	57,55	102,08	101,85	101,97	1096,60	662,90	1111,60	19,1	0,99845623	2,4402	2,3336	94,63%
125-C	125	56,50	57,05	57,01	56,95	56,88	102,40	102,98	102,69	1127,90	688,10	1132,70	19,1	0,99845623	2,5330	2,3943	98,23%
125-D	125	56,54	56,58	56,74	57,71	56,89	101,91	102,08	102,00	1114,00	674,80	1121,20	19,1	0,99845623	2,4917	2,3965	96,63%
115-A	115	58,74	59,65	59,63	58,09	59,01	101,88	101,95	101,92	1155,80	700,30	1163,80	19,1	0,99845623	2,4898	2,4009	96,55%
115-B	115	57,75	56,26	56,01	56,99	56,75	102,16	102,27	102,22	1128,50	683,30	1134,30	19,1	0,99845623	2,4984	2,4232	96,89%
115-C	115	57,18	57,30	56,60	56,45	56,88	101,83	101,94	101,89	1125,40	684,20	1131,20	19,1	0,99845623	2,5138	2,4267	97,48%
115-D	115	56,87	57,49	57,27	58,34	57,49	101,93	101,88	101,91	1132,60	689,40	1136,90	19,1	0,99845623	2,5270	2,4154	98,00%
75-F	155	56,40	55,74	54,70	55,04	55,47	101,87	101,88	101,88	1113,50	677,10	1115,00	19,7	0,998336934	2,5386	2,4627	98,45%

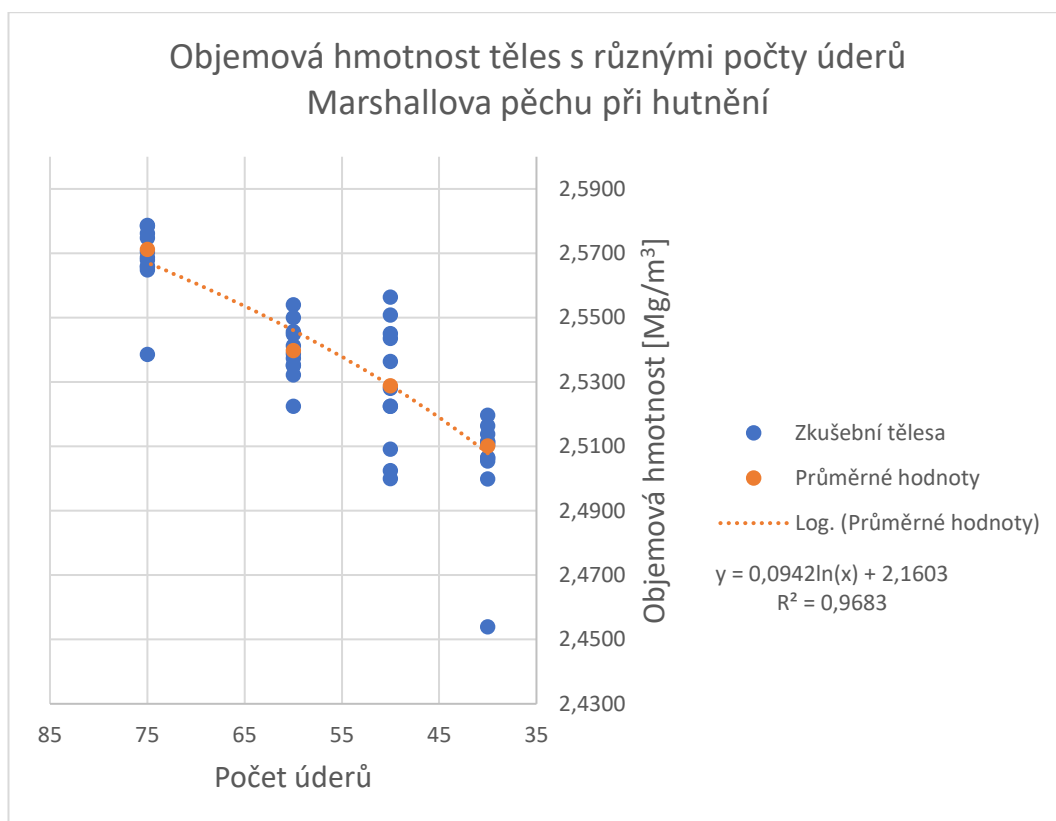
Příloha 2 – Objemová hmotnost těles s různou teplotou směsi při hutnění



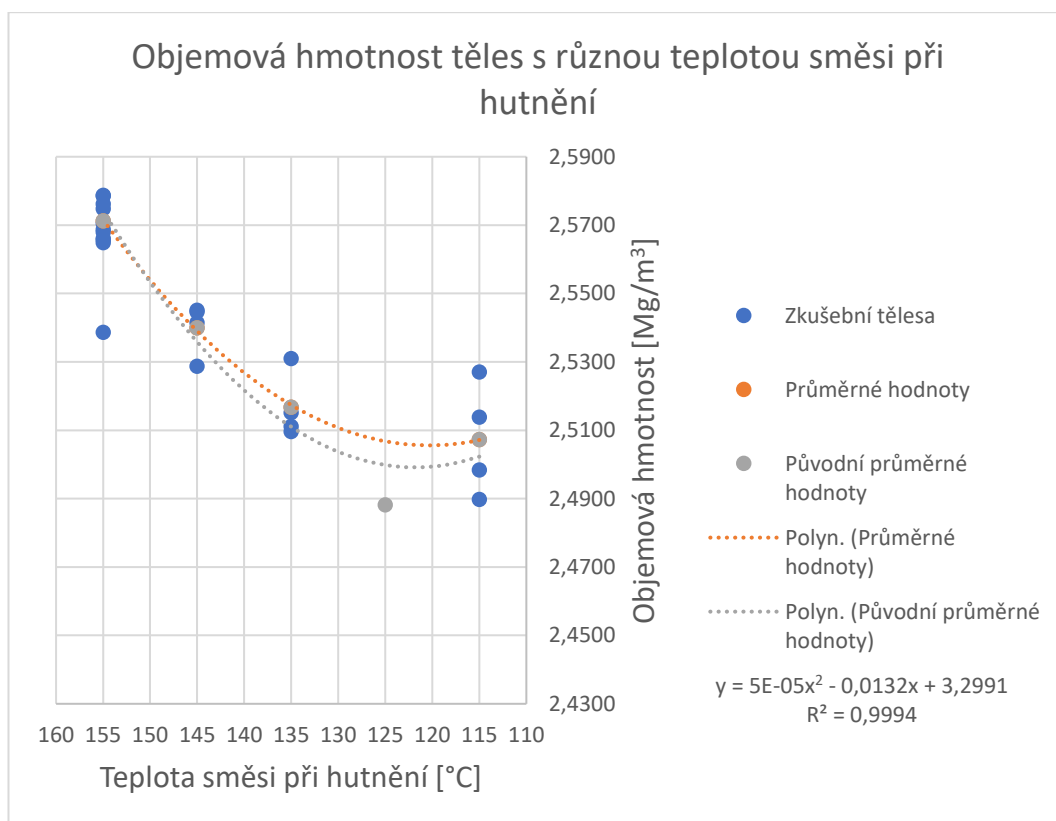
Příloha 3 – Porovnání metod zjišťování objemové hmotnosti těles s různým počtem úderů



Příloha 4 - Porovnání metod zjišťování objemové hmotnosti těles s různou teplotou směsi při hutnění



Příloha 5 – Objemová hmotnost těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při hutnění



Příloha 6 - Objemová hmotnost těles s různou teplotou směsi při hutnění



Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 0 °C							
Těleso	Počet úderů	ρ_{hssd} - Objemová hmotnost [Mg/m^3]	Poměrná objemová hmotnost ve skupině	θ - Teplota při zkoušce [$^{\circ}\text{C}$]	E' - Modul tuhosti [Mpa]		
					1. Měřený průměr	2. Měřený průměr	E' - Průměrná naměřená hodnota
75-D	75	2,5704	99,97%	0	24836	25041	24938,5
75-E	75	2,5648	99,75%	0	22950	24493	23721,5
75-I	75	2,5748	100,14%	0	25324	23306	24315
75-J	75	2,5657	99,79%	0	27734	25310	26522
75-K	75	2,5687	99,90%	0	24870	26697	25783,5
60-D	60	2,5540	100,56%	0	28861	25077	26969
60-E	60	2,5374	99,91%	0	26276	25623	25949,5
60-F	60	2,5388	99,97%	0	22789	23454	23121,5
60-G	60	2,5322	99,70%	0	21094	21027	21060,5
60-H	60	2,5456	100,23%	0	25905	24507	25206
60-I	60	2,5500	100,40%	0	24905	25824	25364,5
50-D	50	2,5224	99,75%	0	22367	22236	22301,5
50-E	50	2,5225	99,75%	0	23553	21541	22547
50-F	50	2,5025	98,96%	0	11911	11475	11693
50-G	50	2,5436	100,58%	0	19283	17300	18291,5
50-H	50	2,5000	98,86%	0	22074	21663	21868,5
50-I	50	2,5091	99,22%	0	24381	20245	22313
40-C	40	2,5197	100,38%	0	21257	23476	22366,5
40-E	40	2,5106	100,02%	0	21665	22100	21882,5
40-F	40	2,5055	99,82%	0	20285	19143	19714
40-G	40	2,5063	99,85%	0	0	0	0
40-H	40	2,5113	100,05%	0	21123	21626	21374,5
40-D	40	2,4539	97,76%	0	16460	15829	16144,5
75-F	75	2,5386	98,73%	0	22398	26223	24310,5

Příloha 7 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 0 °C



Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 0 °C									
Těleso	Teplota směsi [°C]	$\rho_{b,ssd}$ - Objemová hmotnost [Mg/m ³]	Poměrná objemová hmotnost ve skupině	Θ - Teplota při zkoušce [°C]	E' - Modul tuhosti [Mpa]			Ověření rozmezí	
					1. Měřený průměr	2. Měřený průměr	E' - Průměrná naměřená hodnota		
75-D	155	2,5704	99,97%	0	24836	25041	24938,5	vyhovuje	
75-E	155	2,5648	99,75%	0	22950	24493	23721,5	vyhovuje	
75-I	155	2,5748	100,14%	0	25324	23306	24315	vyhovuje	
75-J	155	2,5657	99,79%	0	27734	25310	26522	vyhovuje	
75-K	155	2,5687	99,90%	0	24870	26697	25783,5	vyhovuje	
145-A	145	2,5451	100,20%	0	23246	23517	23381,5	vyhovuje	
145-B	145	2,5287	99,56%	0	21234	20486	20860	vyhovuje	
145-C	145	2,5414	100,06%	0	21233	21423	21328	vyhovuje	
145-D	145	2,5446	100,19%	0	25364	23440	24402	vyhovuje	
135-A	135	2,5151	99,94%	0	20705	21083	20894	vyhovuje	
135-B	135	2,5309	100,56%	0	20889	20247	20568	vyhovuje	
135-C	135	2,5111	99,78%	0	21943	22267	22105	vyhovuje	
135-D	135	2,5096	99,72%	0	20803	22141	21472	vyhovuje	
125-A	125	2,4878	99,99%	0	20691	20656	20673,5	vyhovuje	
125-B	125	2,4402	98,07%	0	16283	16808	16545,5	vyhovuje	
125-C	125	2,5330	101,80%	0	21133	21262	21197,5	vyhovuje	
125-D	125	2,4917	100,14%	0	18755	18874	18814,5	vyhovuje	
115-A	115	2,4898	99,31%	0	19697	18632	19164,5	vyhovuje	
115-B	115	2,4984	99,65%	0	19999	19362	19680,5	vyhovuje	
115-C	115	2,5138	100,26%	0	20335	20610	20472,5	vyhovuje	
115-D	115	2,5270	100,79%	0	23247	22134	22690,5	vyhovuje	
75-F	155	2,5386	98,73%	0	22398	26223	24310,5	vyhovuje	

Příloha 8 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 0 °C



Třída	Počet úderů	hmotnost [kg/m ³]	hmotnost ve skupině	sklon [°]	E - Moduly tuhosti [N/mm ²]		
					1. Měřítko	2. Měřítko	3. Měřítko
12-E	12	52386	2813%	12	11841	11246	11662
40-D	40	54236	2116%	12	8366	8115	8582
40-H	40	52113	10002%	12	13188	11130	11686
40-G	40	52063	2822%	12	12406	13682	14162
40-E	40	52022	2835%	12	2130	8868	2014
40-C	40	52106	10005%	12	10124	2832	10586
20-I	20	52161	10038%	12	11064	11412	11362
20-H	20	52061	2835%	12	13522	13516	13562
20-G	20	52000	2886%	12	13588	11668	13158
20-E	20	52436	10028%	12	2640	10083	28612
20-D	20	52032	2866%	12	4611	4236	4218
20-C	20	52552	2812%	12	13054	13111	133612
20-B	20	52554	2812%	12	11188	11603	11662
20-A	20	52200	10040%	12	13860	13635	13161
20-H	20	52426	10053%	12	4380	1366	28542
20-G	20	52335	2810%	12	11221	11241	11225
20-E	20	52388	2811%	12	11153	10100	106142
20-D	20	52314	2811%	12	13821	11613	13535
20-C	20	52240	10026%	12	13812	13600	133812
20-B	20	52681	2810%	12	13403	13601	13122
20-A	20	52621	2811%	12	13214	13516	13362
20-H	20	52148	10014%	12	13268	13611	136342
20-G	20	52648	2812%	12	13862	13515	132232
20-D	20	52104	2811%	12	10642	10610	106212

Příloha 9 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 15 °C



Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 15 °C									
Těleso	Teplota směsi [°C]	ρ_{bsd} - Objemová hmotnost [Mg/m ³]	Poměrná objemová hmotnost ve skupině	Θ - Teplota při zkoušce [°C]	E' - Modul tuhosti [Mpa]			Ověření rozmezí	
					1. Měřený průměr	2. Měřený průměr	E' - Průměrná naměřená hodnota		
75-D	155	2,5704	99,97%	15	10945	10970	10957,5		vyhovuje
75-E	155	2,5648	99,75%	15	12895	12212	12553,5		vyhovuje
75-I	155	2,5748	100,14%	15	12598	12671	12634,5		vyhovuje
75-J	155	2,5657	99,79%	15	12574	12216	12395		vyhovuje
75-K	155	2,5687	99,90%	15	13403	12907	13155		vyhovuje
145-A	145	2,5451	100,20%	15	10395	10315	10355		vyhovuje
145-B	145	2,5287	99,56%	15	10382	10022	10202		vyhovuje
145-C	145	2,5414	100,06%	15	8288	7933	8110,5		vyhovuje
145-D	145	2,5446	100,19%	15	10780	10625	10702,5		vyhovuje
135-A	135	2,5151	99,94%	15	10577	9676	10126,5		vyhovuje
135-B	135	2,5309	100,56%	15	9850	10035	9942,5		vyhovuje
135-C	135	2,5111	99,78%	15	10099	9871	9985		vyhovuje
135-D	135	2,5096	99,72%	15	10362	10734	10548		vyhovuje
125-A	125	2,4878	99,99%	15	8753	9071	8912		vyhovuje
125-B	125	2,4402	98,07%	15	8294	7628	7961		vyhovuje
125-C	125	2,5330	101,80%	15	8600	8598	8599		vyhovuje
125-D	125	2,4917	100,14%	15	9604	8553	9078,5		vyhovuje
115-A	115	2,4898	99,31%	15	7763	7806	7784,5		vyhovuje
115-B	115	2,4984	99,65%	15	7693	8383	8038		vyhovuje
115-C	115	2,5138	100,26%	15	8691	9256	8973,5		vyhovuje
115-D	115	2,5270	100,79%	15	9502	9415	9458,5		vyhovuje
75-F	155	2,5386	98,73%	15	11841	11549	11695		vyhovuje

Příloha 10 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 15 °C



Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 27 °C									
Těleso	Počet úderů	ρ_{bssd} - Objemová hmotnost [Mg/m^3]	Poměrná objemová hmotnost ve skupině	θ - Teplota při zkoušce [$^{\circ}\text{C}$]	E' - Modul tuhosti [Mpa]			Ověření rozmezí	
					1. Měřený průměr	2. Měřený průměr	E' - Průměrná naměřená hodnota		
75-D	75	2,5704	99,97%	27	4841	4622	4731,5	vyhovuje	
75-E	75	2,5648	99,75%	27	5149	4939	5044	vyhovuje	
75-I	75	2,5748	100,14%	27	5562	5273	5417,5	vyhovuje	
75-J	75	2,5657	99,79%	27	5280	5628	5454	vyhovuje	
75-K	75	2,5687	99,90%	27	5014	5227	5120,5	vyhovuje	
60-D	60	2,5540	100,56%	27	5894	5713	5803,5	vyhovuje	
60-E	60	2,5374	99,91%	27	5719	5445	5582	vyhovuje	
60-F	60	2,5388	99,97%	27	4968	4494	4731	vyhovuje	
60-G	60	2,5322	99,70%	27	4963	4841	4902	vyhovuje	
60-H	60	2,5456	100,23%	27	4587	4491	4539	vyhovuje	
60-I	60	2,5500	100,40%	27	5534	5559	5546,5	vyhovuje	
50-D	50	2,5224	99,75%	27	4965	4921	4943	vyhovuje	
50-E	50	2,5225	99,75%	27	5712	5709	5710,5	vyhovuje	
50-F	50	2,5025	98,96%	27	1991	1848	1919,5	vyhovuje	
50-G	50	2,5436	100,58%	27	3858	3797	3827,5	vyhovuje	
50-H	50	2,5000	98,86%	27	5555	5644	5599,5	vyhovuje	
50-I	50	2,5091	99,22%	27	5379	5323	5351	vyhovuje	
40-C	40	2,5197	100,38%	27	4544	4472	4508	vyhovuje	
40-E	40	2,5106	100,02%	27	4590	4501	4545,5	vyhovuje	
40-F	40	2,5055	99,82%	27	3889	3656	3772,5	vyhovuje	
40-G	40	2,5063	99,85%	27	4867	destrukce	4867	vyhovuje	
40-H	40	2,5113	100,05%	27	4755	4517	4636	vyhovuje	
40-D	40	2,4539	97,76%	27	3596	3468	3532	vyhovuje	
75-F	75	2,5386	98,73%	27	4815	4802	4808,5	vyhovuje	

Příloha 11 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 27 °C



Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 27 °C							
Těleso	Teplota směsi [°C]	ρ_{bssd} - Objemová hmotnost [Mg/m ³]	Poměrná objemová hmotnost ve skupině	Θ - Teplota při zkoušce [°C]	E' - Modul tuhosti [Mpa]		
					1. Měřený průměr	2. Měřený průměr	Ověření rozmezí
75-D	155	2,5704	99,97%	27	4841	4622	vyhovuje
75-E	155	2,5648	99,75%	27	5149	4939	vyhovuje
75-I	155	2,5748	100,14%	27	5562	5273	vyhovuje
75-J	155	2,5657	99,79%	27	5280	5628	vyhovuje
75-K	155	2,5687	99,90%	27	5014	5227	vyhovuje
145-A	145	2,5451	100,20%	27	4519	4588	vyhovuje
145-B	145	2,5287	99,56%	27	4273	4009	vyhovuje
145-C	145	2,5414	100,06%	27	3463	3604	vyhovuje
145-D	145	2,5446	100,19%	27	4426	4480	vyhovuje
135-A	135	2,5151	99,94%	27	4321	4132	vyhovuje
135-B	135	2,5309	100,56%	27	4244	4167	vyhovuje
135-C	135	2,5111	99,78%	27	4617	4565	vyhovuje
135-D	135	2,5096	99,72%	27	4624	4239	vyhovuje
125-A	125	2,4878	99,99%	27	3813	3612	vyhovuje
125-B	125	2,4402	98,07%	27	3774	3394	vyhovuje
125-C	125	2,5330	101,80%	27	3795	4053	vyhovuje
125-D	125	2,4917	100,14%	27	4018	4020	vyhovuje
115-A	115	2,4898	99,31%	27	2905	2769	vyhovuje
115-B	115	2,4984	99,65%	27	3163	3059	vyhovuje
115-C	115	2,5138	100,26%	27	3400	3551	vyhovuje
115-D	115	2,5270	100,79%	27	4065	4025	vyhovuje
75-F	155	2,5386	98,73%	27	4815	4802	vyhovuje
						4808,5	vyhovuje

Příloha 12 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 27 °C



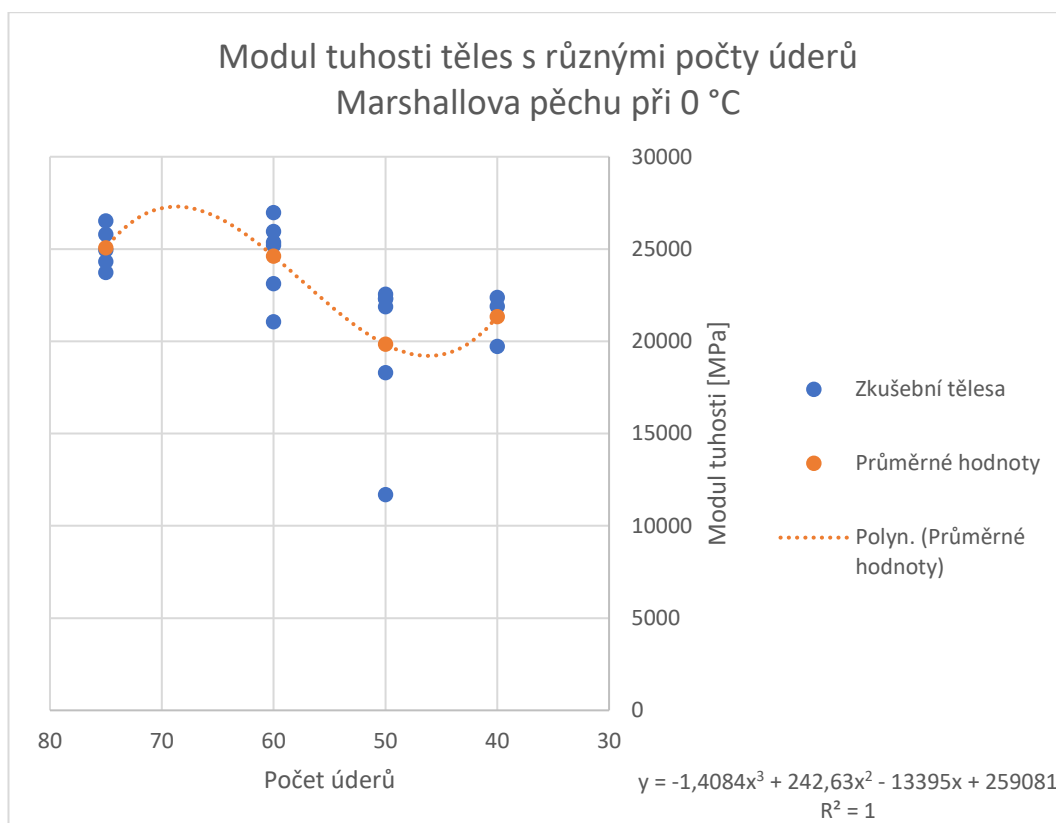
Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 40 °C									
Těleso	Počet úderů	ρ_{bsd} - Objemová hmotnost [Mg/m ³]	Poměrná objemová hmotnost ve skupině	Θ - Teplota při zkoušce [°C]	E' - Modul tuhosti [Mpa]			Ověření rozmezí	
					1. Měřený průměr	2. Měřený průměr	E' - Průměrná naměřená hodnota		
75-D	75	2,5704	99,97%	40	1526	1633	1579,5	vyhovuje	
75-E	75	2,5648	99,75%	40	1762	1754	1758	vyhovuje	
75-I	75	2,5748	100,14%	40	1843	2070	1956,5	vyhovuje	
75-J	75	2,5657	99,79%	40	1944	2506	2225	vyhovuje	
75-K	75	2,5687	99,90%	40	1743	1934	1838,5	vyhovuje	
60-D	60	2,5540	100,56%	40	1802	1893	1847,5	vyhovuje	
60-E	60	2,5374	99,91%	40	1934	1944	1939	vyhovuje	
60-F	60	2,5388	99,97%	40	1948	1815	1881,5	vyhovuje	
60-G	60	2,5322	99,70%	40	1408	1513	1460,5	vyhovuje	
60-H	60	2,5456	100,23%	40	1581	1615	1598	vyhovuje	
60-I	60	2,5500	100,40%	40	2240	2101	2170,5	vyhovuje	
50-D	50	2,5224	99,75%	40	2153	2252	2202,5	vyhovuje	
50-E	50	2,5225	99,75%	40	2283	2198	2240,5	vyhovuje	
50-F	50	2,5025	98,96%	40	720	665	692,5	vyhovuje	
50-G	50	2,5436	100,58%	40	1145	1066	1105,5	vyhovuje	
50-H	50	2,5000	98,86%	40	2275	2164	2219,5	vyhovuje	
50-I	50	2,5091	99,22%	40	2028	1984	2006	vyhovuje	
40-C	40	2,5197	100,38%	40	1496	1466	1481	vyhovuje	
40-E	40	2,5106	100,02%	40	1694	1426	1560	vyhovuje	
40-F	40	2,5055	99,82%	40	1114	984	1049	vyhovuje	
40-G	40	2,5063	99,85%	40	0	0	0	vyhovuje	
40-H	40	2,5113	100,05%	40	1659	1526	1592,5	vyhovuje	
40-D	40	2,4539	97,76%	40	1168	1189	1178,5	vyhovuje	
75-F	75	2,5386	98,73%	40	1983	1709	1846	vyhovuje	

Příloha 13 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 40 °C

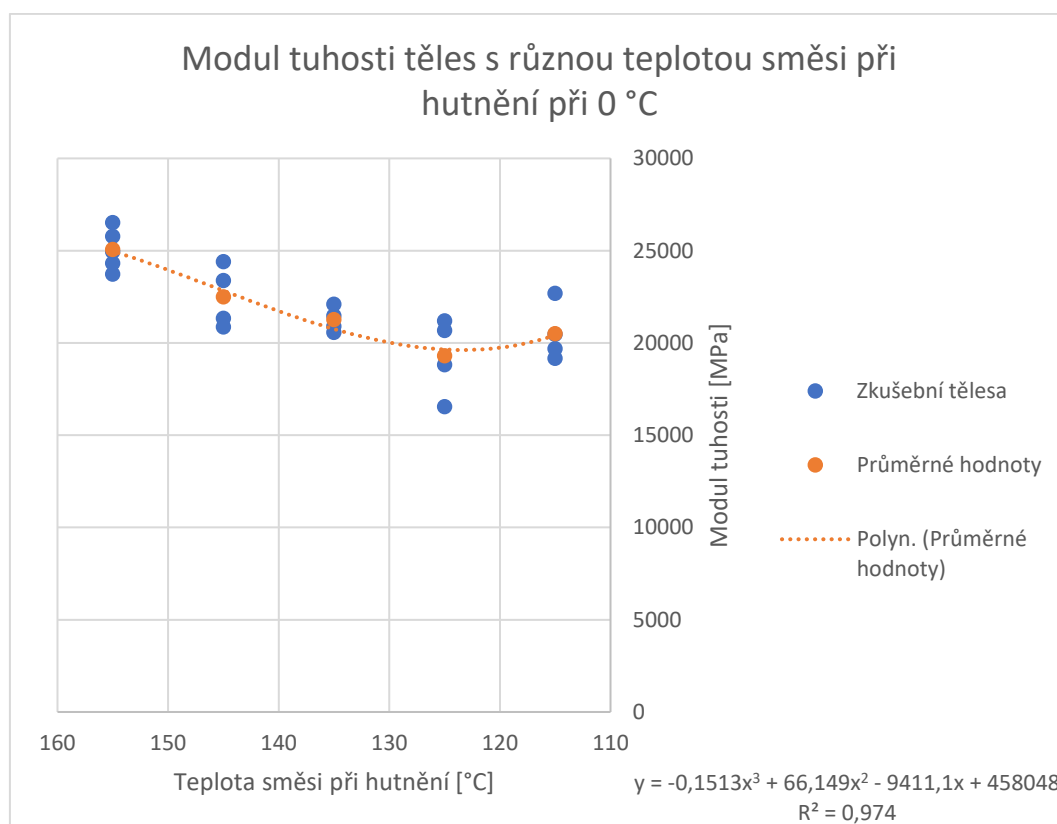


Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 40 °C									
Těleso	Teplota směsi [°C]	ρ_{bissd} - Objemová hmotnost [Mg/m ³]	Poměrná objemová hmotnost ve skupině	θ - Teplota při zkoušce [°C]	E' - Modul tuhosti [Mpa]			Ověření rozmezí	
					1. Měřený průměr	2. Měřený průměr	E' - Průměrná naměřená hodnota		
75-D	155	2,5704	99,97%	40	1526	1633	1579,5	vyhovuje	
75-E	155	2,5648	99,75%	40	1762	1754	1758	vyhovuje	
75-I	155	2,5748	100,14%	40	1843	2070	1956,5	vyhovuje	
75-J	155	2,5657	99,79%	40	1944	2506	2225	vyhovuje	
75-K	155	2,5687	99,90%	40	1743	1934	1838,5	vyhovuje	
145-A	145	2,5451	100,20%	40	1610	1482	1546	vyhovuje	
145-B	145	2,5287	99,56%	40	1388	1138	1263	vyhovuje	
145-C	145	2,5414	100,06%	40	1066	1231	1148,5	vyhovuje	
145-D	145	2,5446	100,19%	40	1358	1175	1266,5	vyhovuje	
135-A	135	2,5151	99,94%	40	1282	1319	1300,5	vyhovuje	
135-B	135	2,5309	100,56%	40	1448	1363	1405,5	vyhovuje	
135-C	135	2,5111	99,78%	40	1284	1254	1269	vyhovuje	
135-D	135	2,5096	99,72%	40	1282	1460	1371	vyhovuje	
125-A	125	2,4878	99,99%	40	1060	1590	1325	vyhovuje	
125-B	125	2,4402	98,07%	40	1171	1158	1164,5	vyhovuje	
125-C	125	2,5330	101,80%	40	1109	965	1037	vyhovuje	
125-D	125	2,4917	100,14%	40	1349	1590	1469,5	vyhovuje	
115-A	115	2,4898	99,31%	40	984	944	964	vyhovuje	
115-B	115	2,4984	99,65%	40	700	724	712	vyhovuje	
115-C	115	2,5138	100,26%	40	988	953	970,5	vyhovuje	
115-D	115	2,5270	100,79%	40	1028	1135	1081,5	vyhovuje	
75-F	155	2,5386	98,73%	40	1983	1709	1846	vyhovuje	

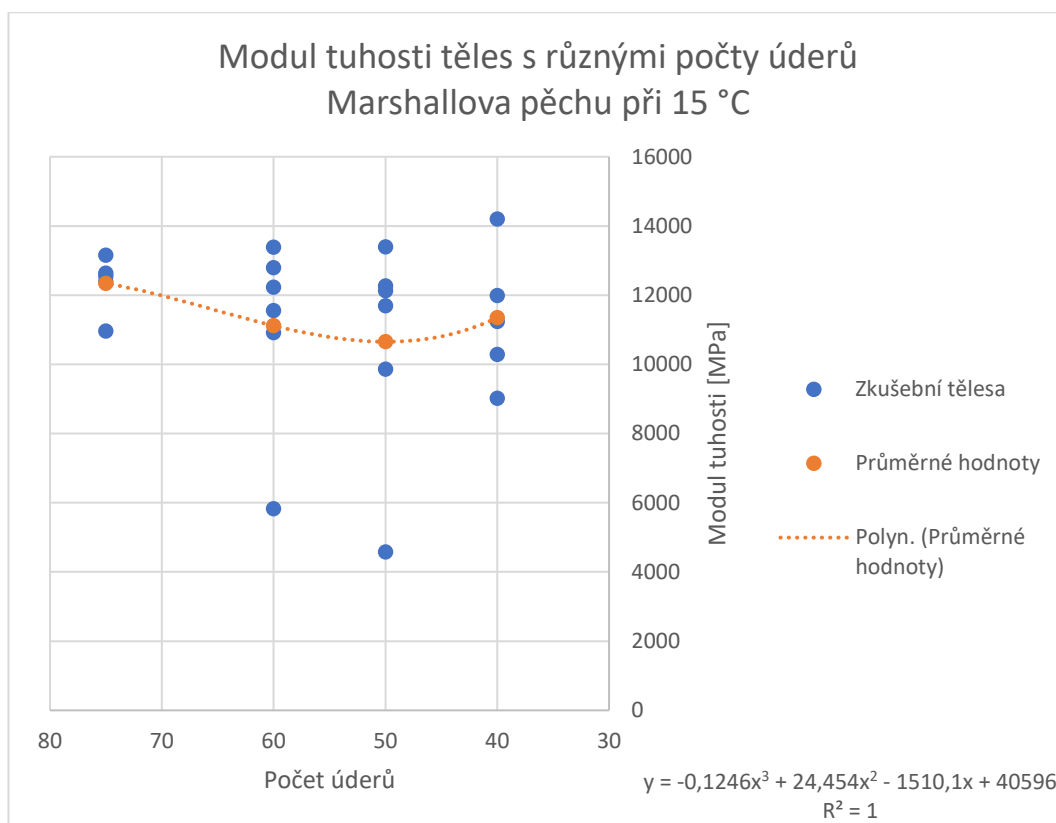
Příloha 14 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 40 °C



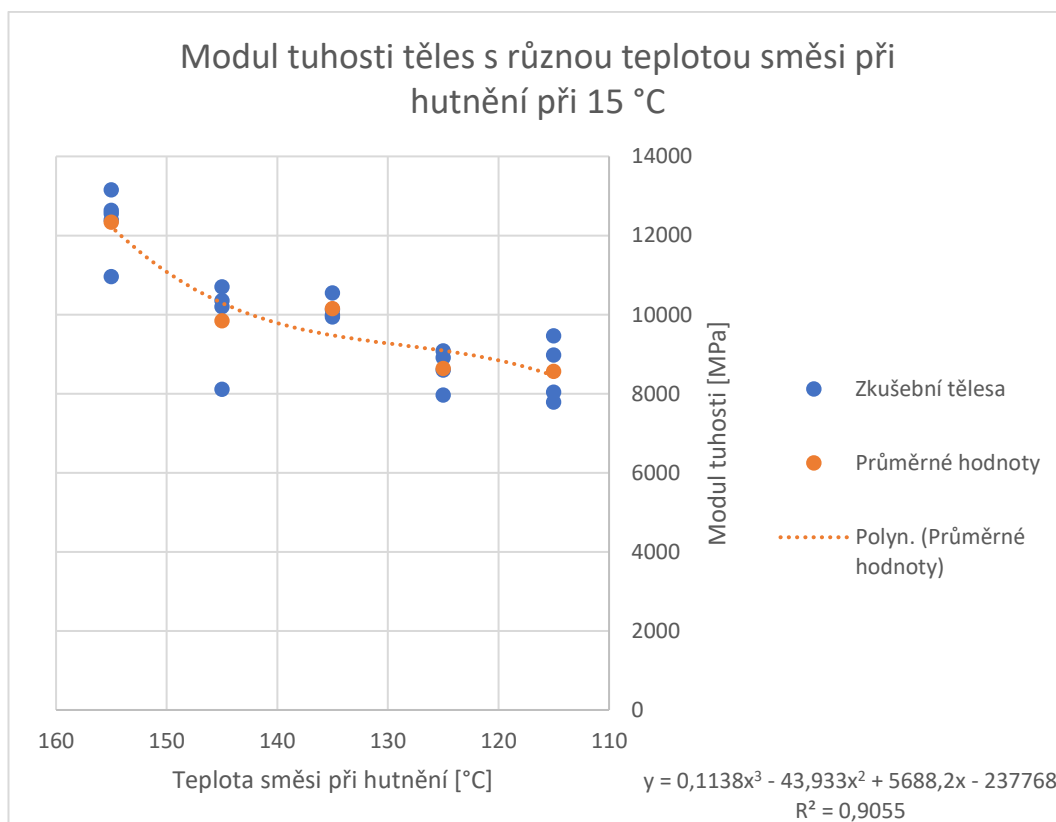
Příloha 15 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 0 °C



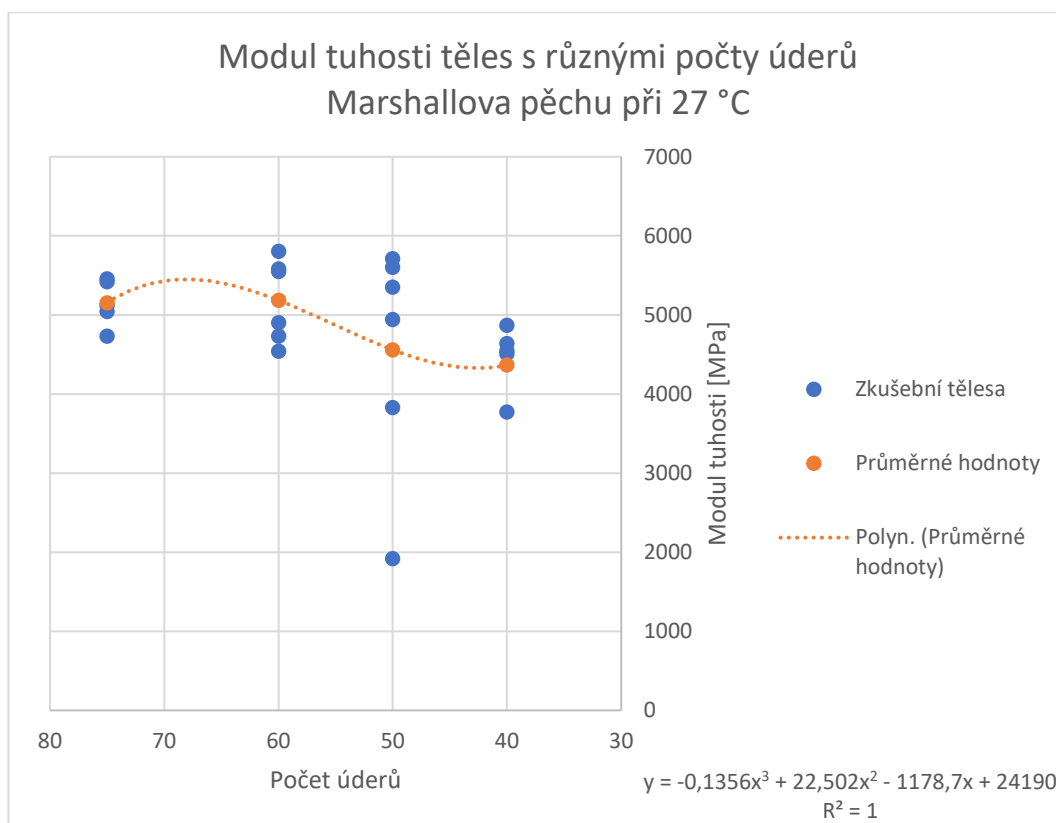
Příloha 16 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 0 °C



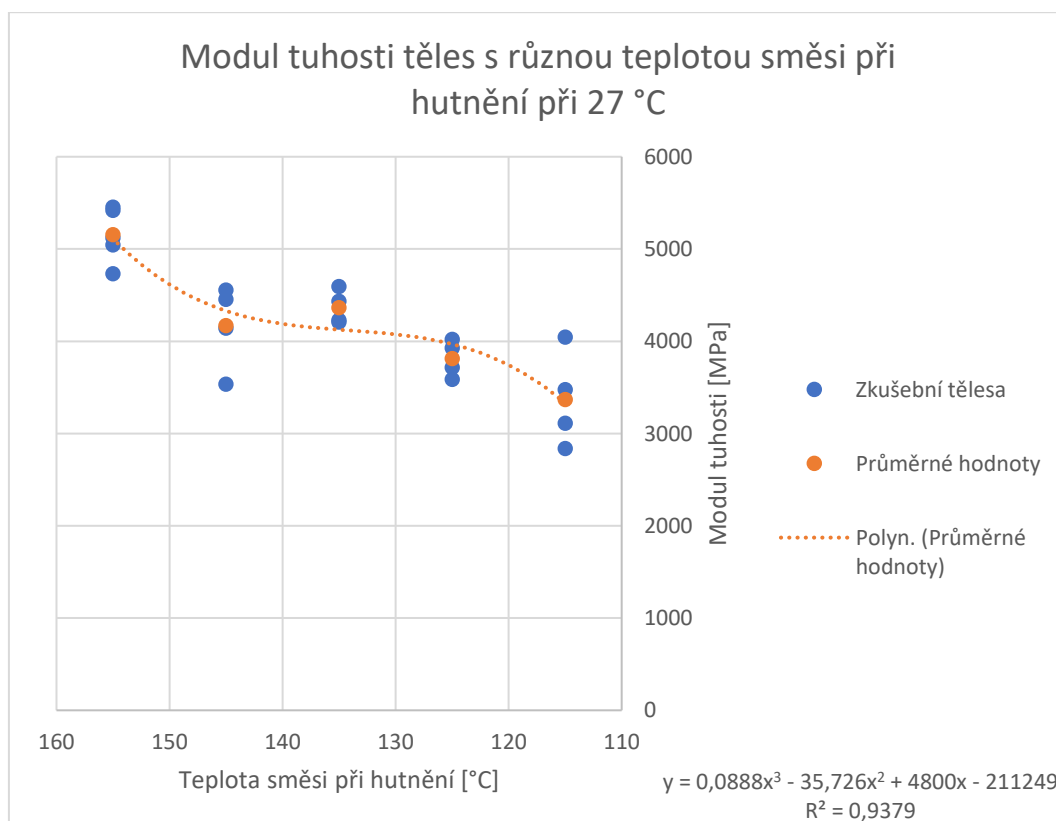
Příloha 17 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 15 °C



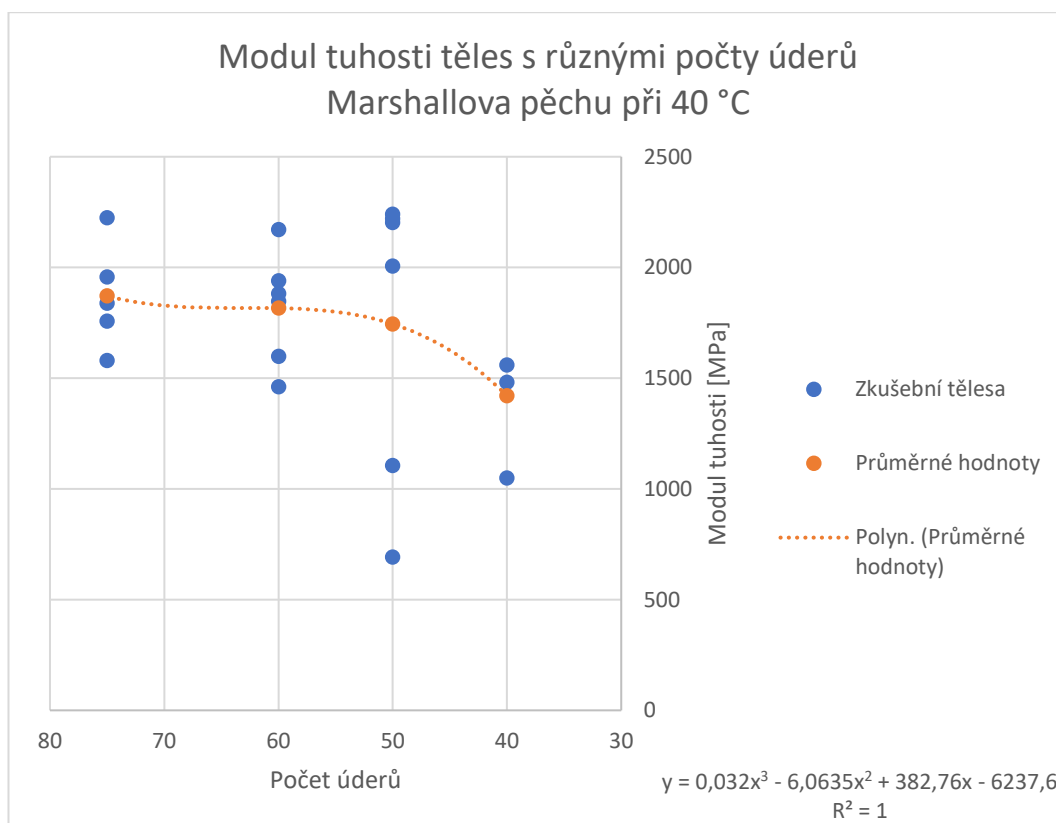
Příloha 18 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 15 °C



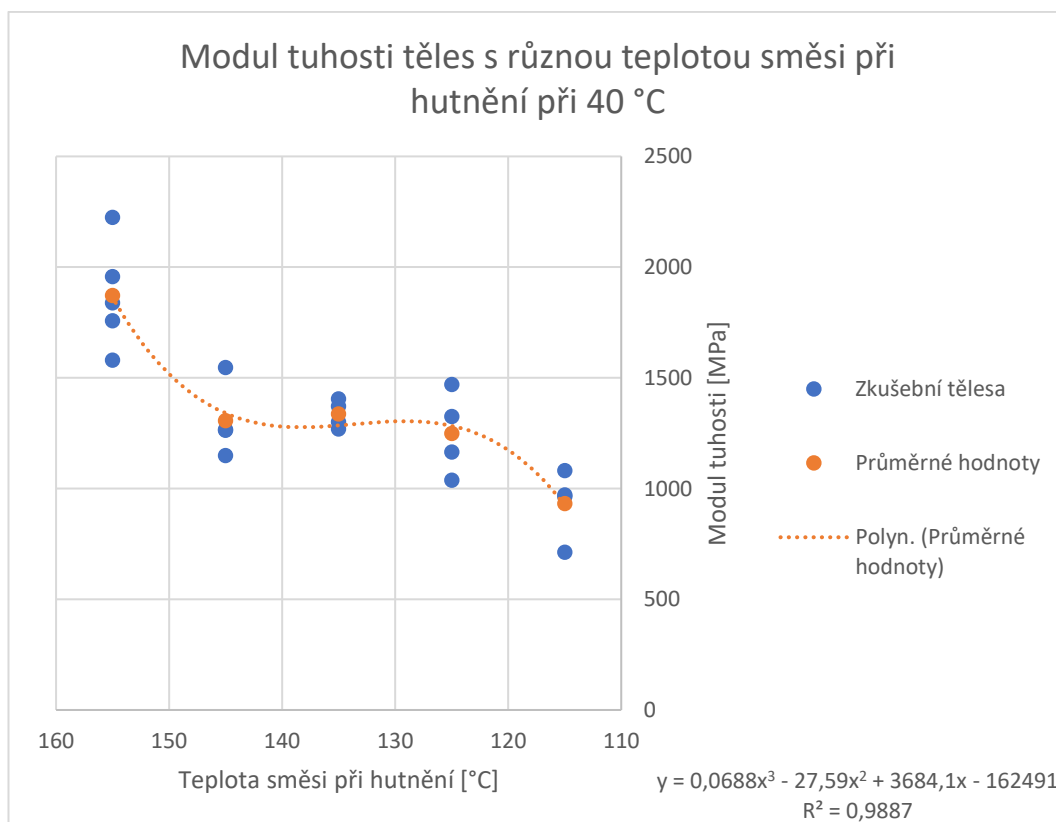
Příloha 19 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 27 °C



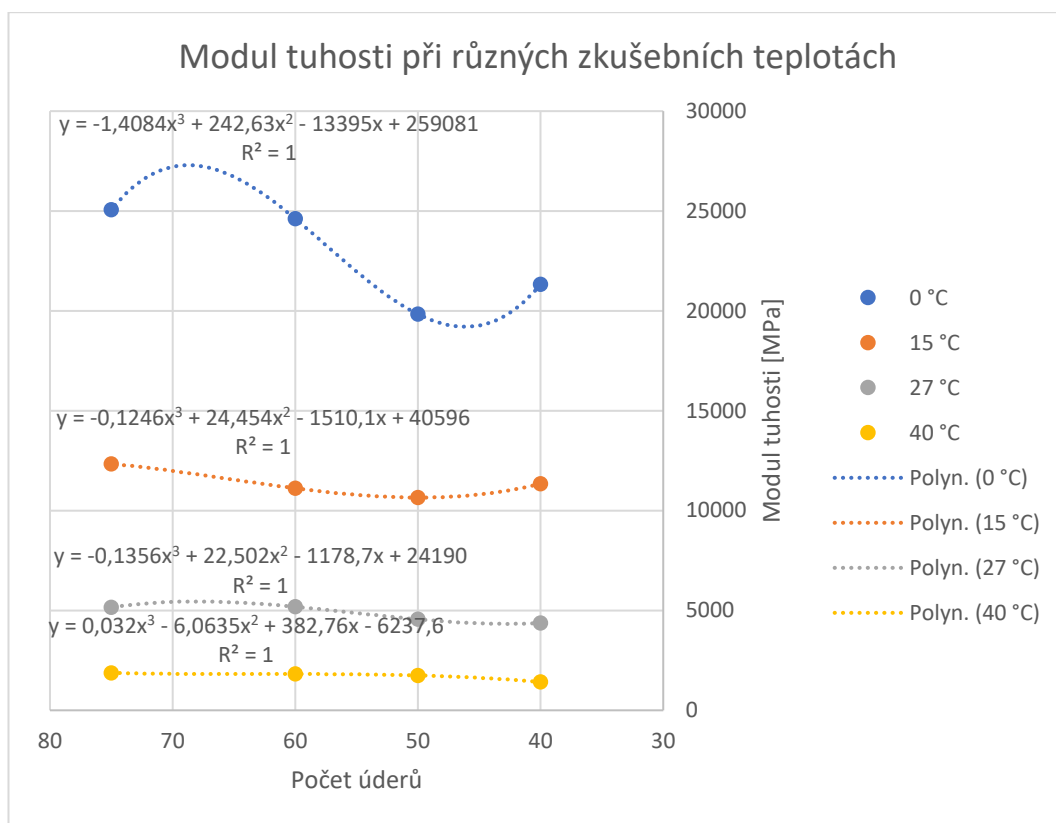
Příloha 20 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 27 °C



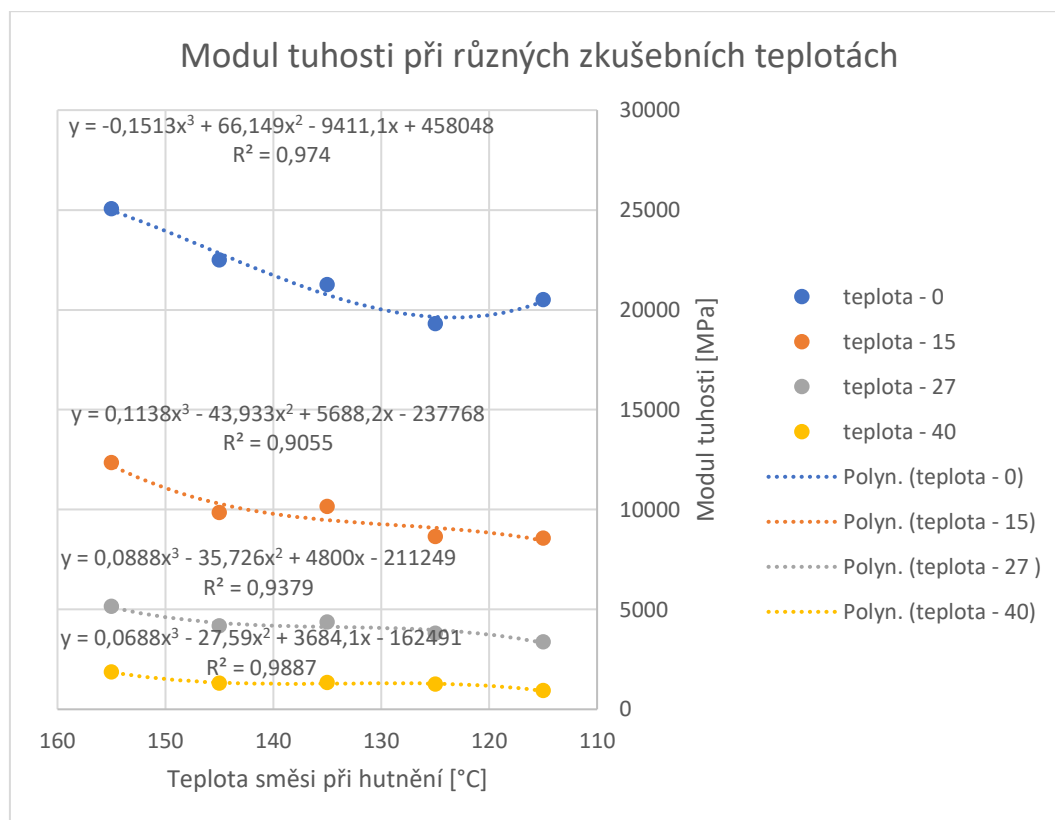
Příloha 21 - Modul tuhosti těles s různými počty úderů Marshallova pěchu při 40 °C



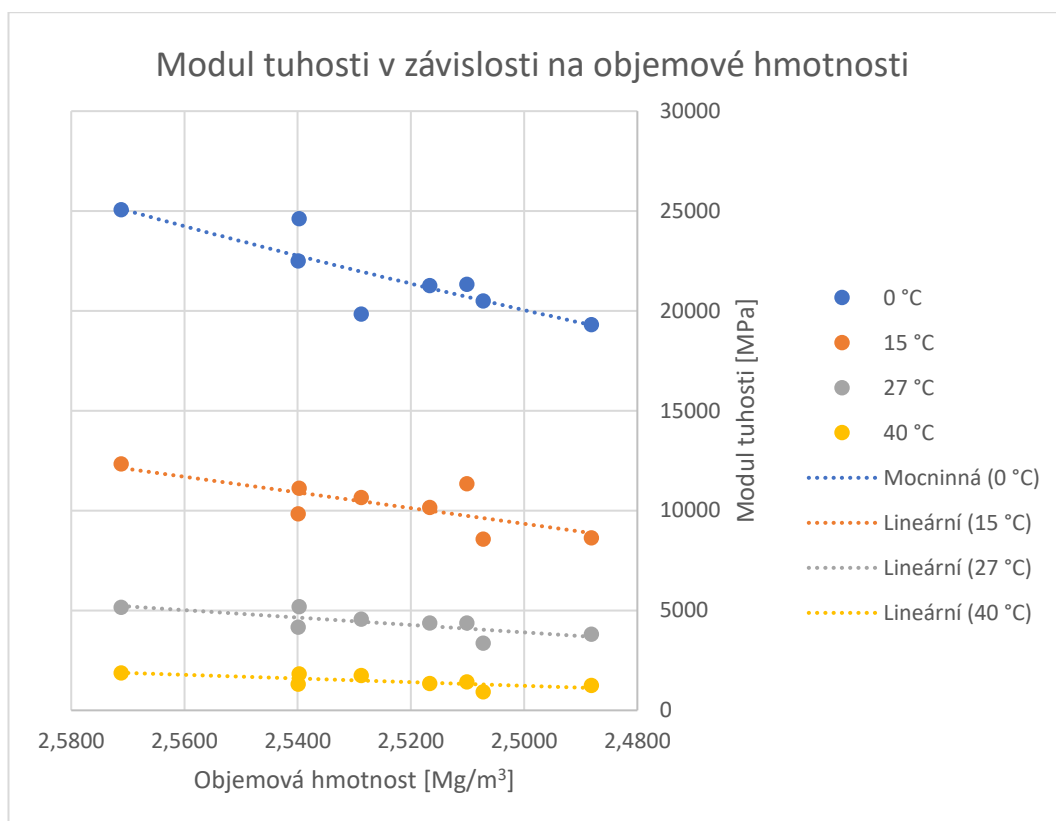
Příloha 22 - Modul tuhosti těles s různou teplotou směsi při hutnění při 40 °C



Příloha 23 - Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách



Příloha 24 - Modul tuhosti při různých zkušebních teplotách



Příloha 25 - Modul tuhosti v závislosti na objemové hmotnosti

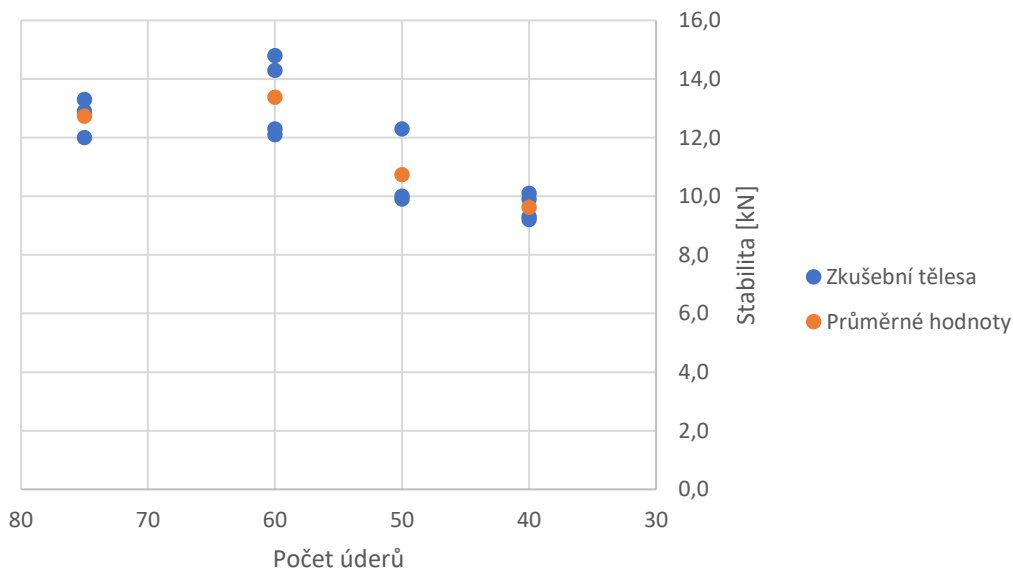


Výsledky Marshallovy zkoušky – tělesa s různým počtem úderů										
řetěso	Počet úderů	ρ - Objemová hmotnost [Mg/m ³]	S - Stabilita [kN]	Odchylka stability	F - Přetvoření [mm]	Odchylka přetvoření	Míra stability [0,1kN/mm]	øS - Průměrná stabilita [kN]	øF - Průměrné Přetvoření [mm]	Průměrná míra stability [0,1kN/mm]
75-A	75	2,5661	13,3	-4,5%	2,7	-5,2%	49,26	12,7	2,6	49,61
75-B	75	2,5786	12,9	-1,3%	2,2	14,3%	58,64			
75-C	75	2,5785	12,7	0,3%	3,4	-32,5%	37,35			
75-D	75	2,5704	12,0	5,8%	2,8	-9,1%	42,86	13,4	2,5	54,04
60-A	60	2,5353	14,8	-10,7%	2,8	-13,1%	52,86			
60-B	60	2,5225	14,3	-6,9%	2,0	19,2%	71,50			
60-C	60	2,5448	12,1	9,5%	2,7	-9,1%	44,81			
60-D	60	2,5540	12,3	8,0%	2,4	3,0%	51,25	10,7	3,4	31,26
50-A	50	2,5280	9,9	7,8%	3,0	12,6%	33,00			
50-B	50	2,5508	10,0	6,8%	3,6	-4,9%	27,78			
50-C	50	2,5564	12,0	-11,8%	2,5	27,2%	48,00	9,6	3,0	31,82
50-D	50	2,5224	12,3	-14,6%	3,7	-7,8%	33,24			
40-A	40	2,5164	10,1	-4,9%	3,0	0,8%	33,67			
40-B	40	2,5065	9,2	4,4%	2,8	7,4%	32,86	9,7	2,9	33,84
40-C	40	2,5197	9,9	-2,9%	2,8	7,4%	35,36			
40-E	40	2,5106	9,3	3,4%	3,5	-15,7%	26,57			
Výsledky Marshallovy zkoušky – tělesa s různou teplotou směsi při hutnění										
řetěso	Teplota [°C]	ρ - Objemová hmotnost [Mg/m ³]	S - Stabilita [kN]	Odchylka stability	F - Přetvoření [mm]	Odchylka přetvoření	Míra stability [0,1kN/mm]	øS - Průměrná stabilita [kN]	øF - Průměrné Přetvoření [mm]	Průměrná míra stability [0,1kN/mm]
75-A	155	2,5661	13,3	-4,5%	2,7	-5,2%	49,26	12,7	2,6	49,61
75-B	155	2,5786	12,9	-1,3%	2,2	14,3%	58,64			
75-C	155	2,5785	12,7	0,3%	3,4	-32,5%	37,35			
75-D	155	2,5704	12,0	5,8%	2,8	-9,1%	42,86	9,7	2,9	33,84
145-A	145	2,5451	10,1	-4,1%	3,1	-8,1%	32,58			
145-B	145	2,5287	11,8	-21,6%	5,1	-77,9%	23,14			
145-C	145	2,5414	9,4	3,1%	2,3	19,8%	40,87			
145-D	145	2,5446	9,6	1,0%	3,2	-11,6%	30,00	10,6	4,3	24,53
135-A	135	2,5151	11,3	-7,1%	4,9	-14,0%	23,06			
135-B	135	2,5309	10,0	5,21%	4,4	-2,33%	22,73			
135-C	135	2,5111	11,1	-5,21%	4,2	2,33%	26,43	9,1	3,3	27,96
135-D	135	2,5096	9,4	10,9%	2,5	41,9%	37,60			
125-A	125	2,4878	8,3	9,1%	3,4	-4,1%	24,41			
125-B	125	2,4402	8,4	8,0%	4,5	-37,8%	18,67	8,6	3,3	26,46
125-C	125	2,5330	9,6	-5,1%	3,6	-10,2%	26,67			
125-D	125	2,4917	9,5	-4,0%	2,8	14,3%	33,93			
115-A	115	2,4898	8,3	3,5%	3,2	1,5%	25,94			
115-B	115	2,4984	8,6	0,0%	3,1	4,6%	27,74	8,6	3,3	26,46
115-C	115	2,5138	8,3	3,5%	3,4	-4,6%	24,41			
115-D	115	2,5270	9,2	-7,0%	3,3	-1,5%	27,88			

Příloha 26 - Výsledky Marshallovy zkoušky

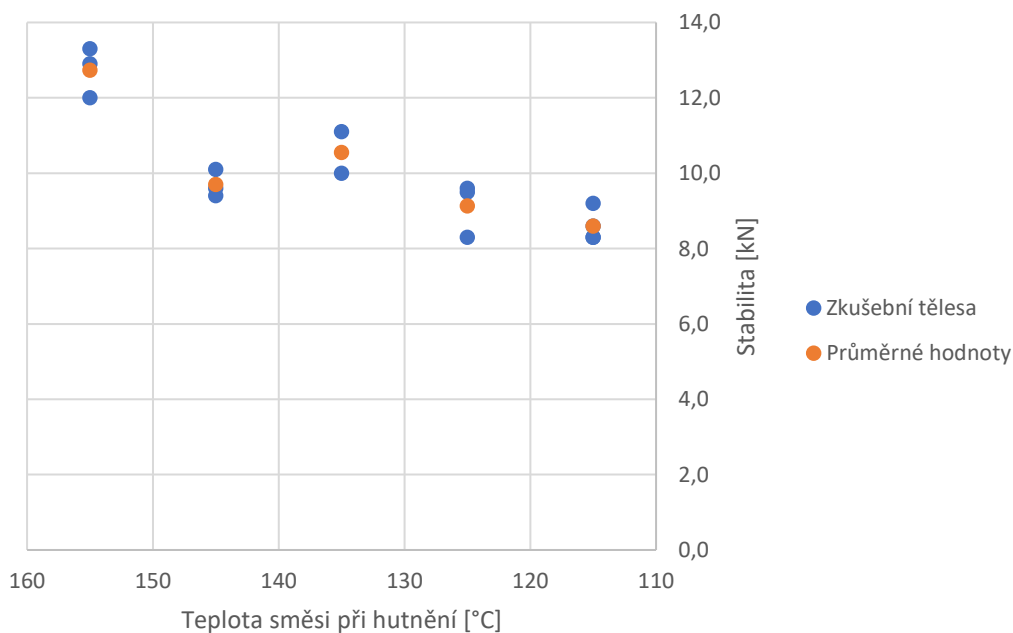


Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem



Příloha 27 - Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem

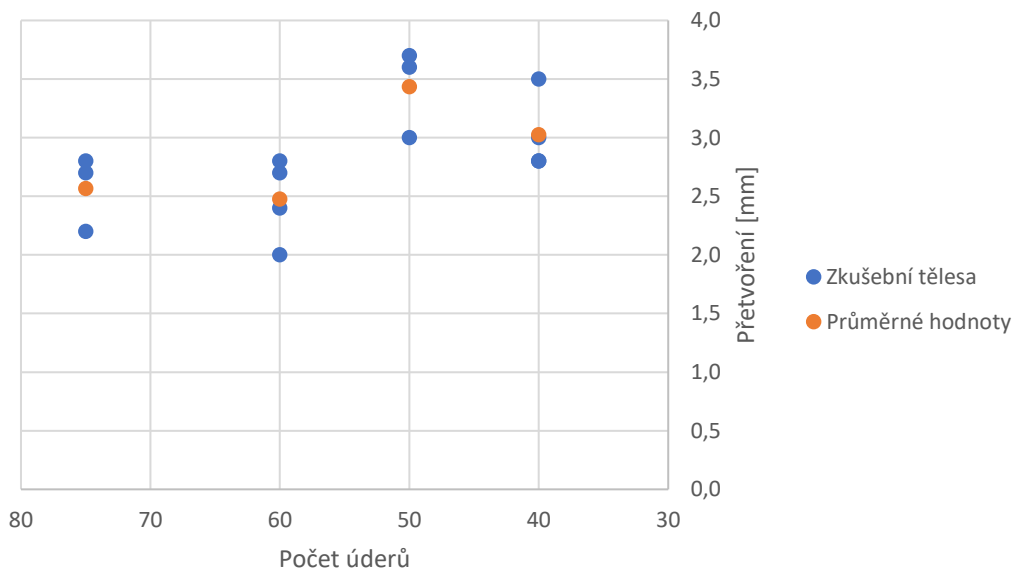
Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění



Příloha 28 - Stabilita dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění

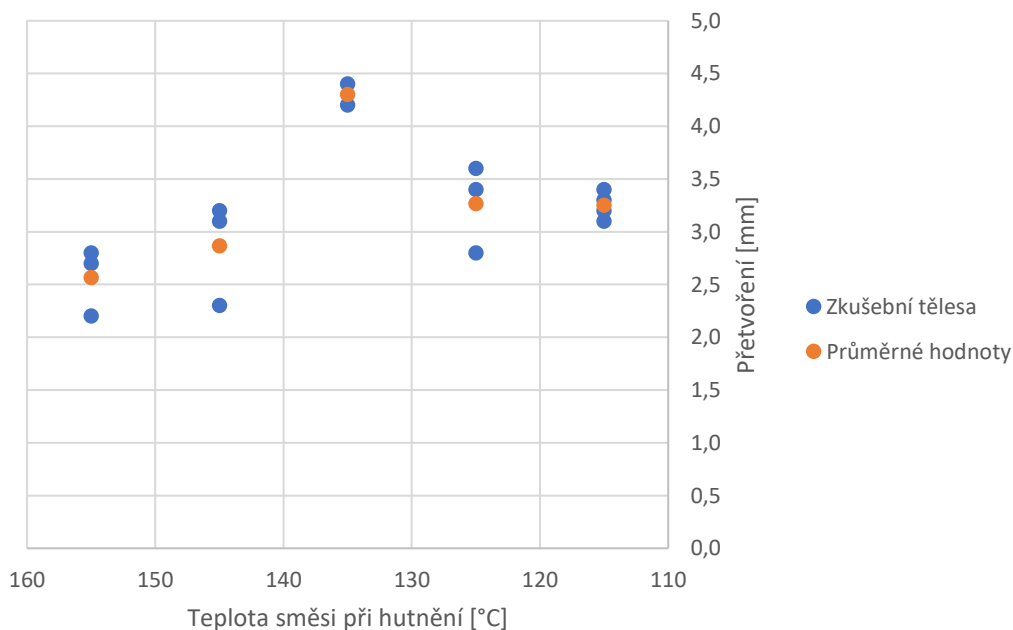


Deformace dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem

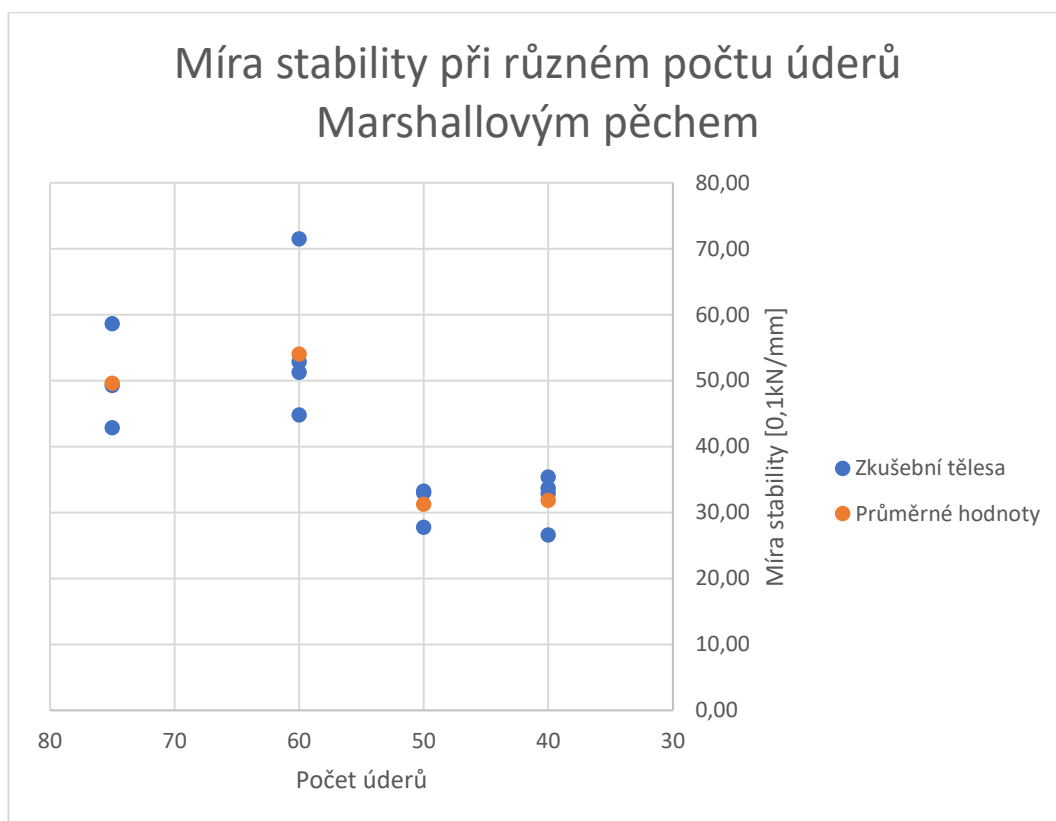


Příloha 29 - Deformace dle Marshallovy zkoušky při různém počtu úderů Marshallovým pěchem

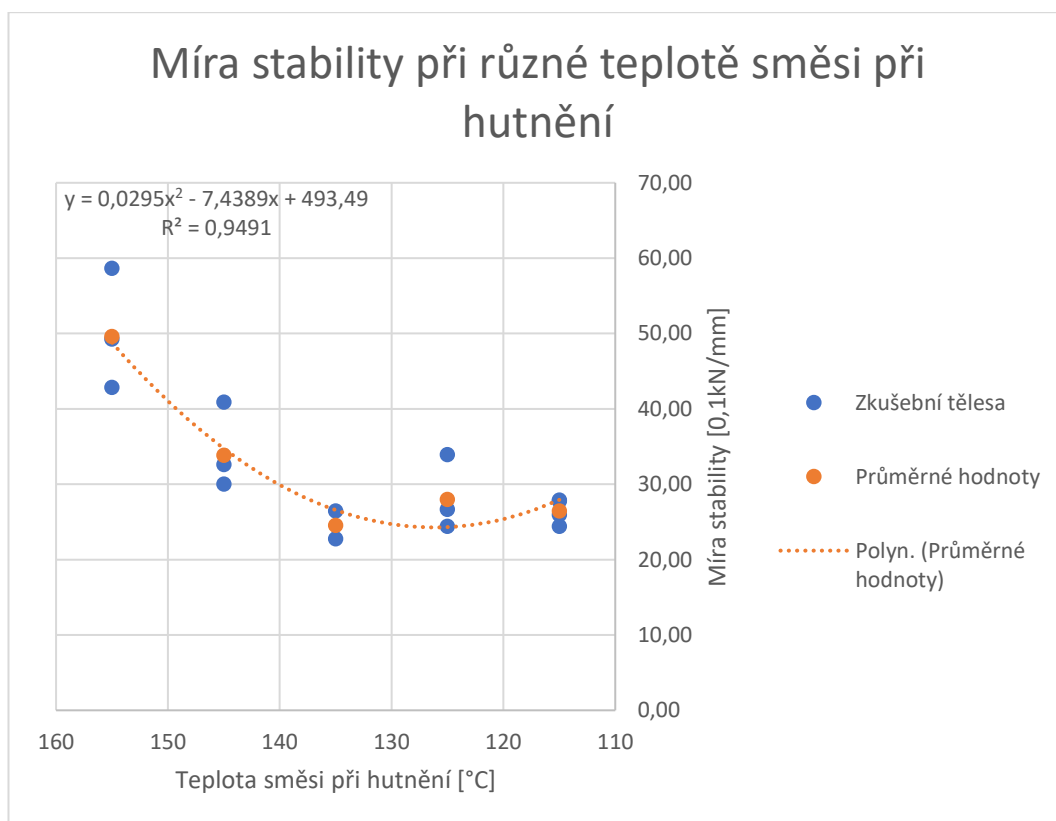
Deformace dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění



Příloha 30 - Deformace dle Marshallovy zkoušky při různé teplotě směsi při hutnění



Příloha 31 - Míra stability při různém počtu úderů Marshallovým pěchem



Příloha 32 - Míra stability při různé teplotě směsi při hutnění



Stabilita dle Marshallovy zkoušky v závislosti na objemové hmotnosti

